

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - DICAM
Corso di Laurea in Ingegneria Edile/Architettura

TESI DI LAUREA IN
COSTRUZIONI DI STRADE, FERROVIE ED AEROPORTI

IL PROGETTO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI IN MATERIALE LAPIDEO

IL CASO DEL CENTRO STORICO DI MODENA

CANDIDATA
Silvia Costa

RELATORE
Chiar.mo Prof. Ing. Giulio Dondi

CORRELATORI
Dott. Ing. Valeria Vignali, Prof. Ing. Andrea Simone
Prof. Ing. Claudio Galli, Ing. Nabil El Ahmadié

Anno Accademico 2013/2014

a mio papà, a mia mamma

Indice

INTRODUZIONE	1
PARTE 1 Il centro storico di Modena	3
1 ELEMENTI MORFOLOGICI DEL CENTRO STORICO DI MODENA	5
1.1 La Via Emilia	5
1.2 I canali	7
1.3 I perimetri delle antiche fortificazioni e le trasformazioni urbanistiche	12
2 IL PIANO DI RIQUALIFICAZIONE DEL CENTRO STORICO	19
2.1 Gli obiettivi del nuovo piano	19
2.2 Il precedente Piano di Recupero e Riqualificazione del centro storico: il Progetto Cervellati recepito nella Variante al P.R.G. del 1989 . . .	20
2.3 Il Quadro Conoscitivo vigente sulla mobilità del centro storico di Mo- dena	22
2.3.1 La classificazione delle strade e delle zone di traffico	23
2.3.2 Il sondaggio di opinione del 2013 sullo sviluppo urbanistico .	27
3 LE PAVIMENTAZIONI STRADALI AD ELEMENTI LAPIDEI	29
3.1 Carichi massimi previsti per le pavimentazioni stradali del centro sto- rico di Modena	29
3.2 Tipologie storiche di pavimentazione stradale a elementi lapidei . . .	31
3.2.1 La massicciata	32
3.2.2 Il selciato	33
3.2.3 Il lastricato	37
3.3 Caratteristiche dei materiali lapidei utilizzati nel centro storico di Mo- dena	40
PARTE 2 Piazza Roma	41
4 LE TRASFORMAZIONI STORICHE DI PIAZZA ROMA	43
5 GLI ELEMENTI CARATTERISTICI DELLA PIAZZA	55
6 LA PEDONALIZZAZIONE DI PIAZZA ROMA	61
6.1 Il progetto di riqualificazione di Piazza Roma	66

PARTE 3 Le vibrazioni indotte dal traffico stradale	72
7 IL PROBLEMA DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO	75
7.1 Il fenomeno vibratorio	75
7.1.1 Generazione dei carichi dinamici e delle vibrazioni	77
7.1.2 Propagazione delle onde	84
7.1.3 Ricezione delle vibrazioni da parte degli edifici	85
7.2 I meccanismi di danno prodotti dalla propagazione delle vibrazioni negli edifici	87
7.3 Il quadro normativo	89
7.3.1 Valutazione delle vibrazioni e misure strumentali	89
7.3.2 Effetti delle vibrazioni sugli edifici	90
7.3.3 Criteri di valutazione del disturbo arrecato alle persone	90
8 TECNICHE DI ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI	93
8.1 Le tipologie di pacchetti stradali: flessibili, semirigidi e rigidi	93
8.2 Gli interventi di mitigazione	96
8.2.1 Elementi di schermatura	96
8.2.2 Modifiche strutturali della sovrastruttura	98
8.2.3 Modifiche strutturali dello strato di base	101
8.2.4 Modifiche strutturali della fondazione	102
8.2.5 Modifiche strutturali del sottofondo	104
8.3 Efficacia degli interventi di attenuazione su un modello di simulazione della pavimentazione urbana	104
9 LE INDAGINI DIAGNOSTICHE CONDOTTE SULL'ACCADEMIA MILITARE DI MODENA	109
9.1 Analisi termografica all'infrarosso sulle volte del Salone d'Onore dell'Accademia militare di Modena	109
9.2 Analisi dinamica-strutturale con rilievo delle frequenze di vibrazione	112
9.2.1 Risultati delle misure effettuate in continuo (150 minuti)	115
9.2.2 Risultati delle misure effettuate in sequenza (passaggio di autobus e filobus)	118
9.2.3 Analisi dei risultati	121
10 L'INTERVENTO DI ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO PROPOSTO PER PIAZZA ROMA	123
10.1 Il progetto della pavimentazione stradale	127
10.1.1 Strato d'usura	128
10.1.2 Strato di base	130
10.1.3 Strato di fondazione	131
10.2 I dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali	138
10.2.1 Le barriere di sicurezza	139
10.2.2 I separatori di traffico	141

CONCLUSIONI	145
APPENDICE II cantiere in Piazza Roma	151
DEFINIZIONI	159
RINGRAZIAMENTI	161
Bibliografia	165

INTRODUZIONE

La progettazione stradale ha come obiettivo la realizzazione di infrastrutture che garantiscano sempre un buon livello di sicurezza di circolazione, tenendo conto delle diverse modalità di utilizzo che una strada può avere a seconda della categoria a cui appartiene e delle componenti di traffico che deve servire. Il problema principale nella progettazione stradale consiste quindi nel raggiungere un adeguato compromesso fra sicurezza, efficienza ed economia, senza tralasciare le necessità degli utenti.

Con questa tesi di laurea si intende trattare il tema della progettazione delle pavimentazioni stradali in materiale lapideo, approfondendo il problema delle vibrazioni indotte dal traffico. L'argomento oggetto di studio è analizzato nel contesto della realizzazione del nuovo Piano di Riqualificazione del Centro Storico di Modena, con particolare riferimento al cantiere attualmente in corso in Piazza Roma.

La tesi è strutturata in tre parti:

- la prima descrive il centro di Modena a partire da un quadro generale storico-morfologico e di pianificazione urbanistica. La fase iniziale di ricerca è stata svolta attraverso la raccolta di informazioni e documenti sulle tipologie di pavimentazioni stradali ad elementi lapidei e sui diversi materiali tradizionalmente in uso nel territorio modenese. E' stata poi rappresentata la sistemazione attuale delle pavimentazioni del centro storico, analizzando la collocazione dei differenti materiali ed elaborando per ognuno di essi una scheda tecnica descrittiva delle principali caratteristiche e prestazioni;
- la seconda parte presenta il caso di studio di Piazza Roma. Il progetto di recupero per la pedonalizzazione dello spazio pubblico è tuttora in corso di realizzazione: grazie alla collaborazione con il Settore Manutenzione e Logistica del Comune di Modena e in particolare con l'ingegnere Nabil El Ahmadié, Dirigente Responsabile del Servizio, è stato possibile frequentare il cantiere, eseguendo un rilievo fotografico di alcune fasi realizzative della nuova pavimentazione stradale;
- la terza parte riguarda il problema delle vibrazioni indotte dal traffico sulle pavimentazioni stradali ad elementi lapidei: vengono descritti il meccanismo fisico di generazione, propagazione e ricezione delle vibrazioni, gli effetti di danneggiamento che esse possono provocare sulle costruzioni circostanti, le tipologie di intervento note in letteratura e le soluzioni possibili nel caso particolare di Piazza Roma.

Il tema di ricerca di questa tesi è stato affrontato da un punto di vista non solo bibliografico e descrittivo, ma anche critico-progettuale, attraverso un'analisi approfondita delle tecniche di mitigazione delle vibrazioni da traffico.

PARTE 1 Il centro storico di Modena

1 ELEMENTI MORFOLOGICI DEL CENTRO STORICO DI MODENA

La morfologia del centro storico di Modena è caratterizzata da alcuni elementi chiaramente riconoscibili attorno ai quali si sono sviluppati nel corso dei secoli gli spazi pubblici, le strade e gli isolati:

- il TRACCIATO DELLA VIA EMILIA, asse principale dell'impianto urbanistico;
- la STRUTTURA SOTTERRANEA DEI CANALI, alla base della distribuzione spaziale degli isolati;
- il PERIMETRO DELLE DIVERSE CERCHIE MURARIE, segno della progressiva crescita della città.

1.1 La Via Emilia

Durante la campagna di conquista romana della Gallia Cisalpina, il comandante militare M. Emilio Lepido volle assicurare i collegamenti tra l'Italia centrale e i coloni stabiliti in Gallia attraverso la costruzione di un'infrastruttura stradale (figura 1.1). Come riporta lo storico romano Tito Livio nella sua opera *Ab urbe condita*, M. Emilio Lepido fu eletto console nel 187 a.C.

«[...] *viamque a Placentia, ut Flaminiae committeret, Ariminum perduxit*»

«[...] e tracciò una strada da Piacenza a Rimini per collegarsi alla via Flaminia»

Tito Livio, *Ab Urbe Condita*, XXXIX, 2



Figura 1.1 – Tracciato della Via Emilia

La città romana di *Mutina* fu fondata successivamente alla strada, nel 183 a.C., e per questo il suo impianto urbanistico è orientato secondo la direzione della via Emilia.¹

La strada venne realizzata con funzione prevalentemente strategica e militare: confermava il controllo politico romano sul territorio conquistato ai Galli Boi, costituiva una barriera contro le popolazioni liguri ancora indipendenti e collegava in modo efficiente le città fra Piacenza e Rimini, in modo che nessuna rischiasse di rimanere isolata in caso di attacco. Con la fine del II secolo a.C. e dopo le invasioni dei Cimbri e dei Teutoni nel 102-101 a.C., la funzione militare perse importanza e la via Emilia divenne una strada di collegamento a fini prevalentemente commerciali e di rappresentanza: essendo il percorso principale della regione, infatti, lungo di essa vennero disposti luoghi di culto (come il santuario di Cittanova) e le tombe delle famiglie più rilevanti della *nobilitas* romana.



Figura 1.2 – Posizione della città di Mutina nella Tabula Peutingeriana, copia medievale di una mappa del IV secolo¹

In seguito agli interventi di manutenzione stradale promossi in età imperiale da Augusto, la via Emilia fu allargata fino a circa 6 metri e vennero realizzati canali di scolo laterali di circa 1 metro. Nei tratti extraurbani la pavimentazione era in ghiaia,

mentre nelle aree urbane venivano utilizzate anche lastre di trachite (trasportate prevalentemente via fiume dai Colli Euganei).²

Il tracciato attuale della via Emilia è ancora sostanzialmente quello della strada romana soprattutto perché segue la morfologia del territorio: da una parte è orientata parallelamente al margine degli Appennini e dall'altra al fiume Po. L'unica anomalia del percorso nel territorio modenese è l'ampia curva che la strada forma a ovest della città, tra il quartiere della Madonnina e Cittanova: secondo alcuni studiosi la variazione del tracciato avvenne in epoca medievale a causa degli eventi alluvionali che devastarono il territorio.²

1.2 I canali

La città di Modena si trova in una zona ricca di risorse d'acqua: a ovest e a est è circondata dai due fiumi Secchia e Panaro, mentre a sud è presente una vasta area paludosa formata da acque sorgive denominata "i Fontanazzi". Il sistema territoriale e infrastrutturale modenese, quindi, è stato generato dalla via Emilia in direzione est-ovest e dai corsi d'acqua orientati da sud a nord. Per collegare in modo efficiente il territorio nella direzione nord-sud in epoca medievale venne costruito il Naviglio, un canale navigabile che raggiungeva il fiume Po e il Mare Adriatico: la sua realizzazione è storicamente confermata da un documento datato dagli studiosi fra il 1055 e il 1085.³

Fin dai tempi delle prime dominazioni estensi le acque vennero canalizzate artificialmente fino in città, in modo da costituire una vera e propria infrastruttura territoriale al servizio delle attività commerciali e delle vie di comunicazione. Il primo castello estense posto a presidio della città di Modena venne costruito a partire dal 1291 vicino alla "Casa delle Acque", l'area in cui confluivano sia i canali di acque chiare che si originavano dalle paludi a sud della città, sia i canali fluviali derivanti da Secchia e Panaro. In questo modo il castello era posto sulla via d'acqua navigabile che metteva in comunicazione Modena con Ferrara, il Po, Venezia e la Lombardia.⁴

In figura 1.3 sono evidenziati i percorsi dei canali che attraversavano il centro storico: dal fiume Secchia venne realizzata una derivazione che prima di entrare in città si divideva in due rami chiamati Canale di Baggiovara (in azzurro) e Canale della Cerca (in giallo). Il nome "Cerca" trae origine dal fatto che fino al XII secolo esso costituiva il fossato attorno alla cerchia muraria della città medievale: solo in seguito all'ampliamento delle mura avvenuto nel 1188, divenne un canale urbano. Dalle acque del Panaro, mediante una chiusa a monte della città di Vignola, derivava il Canal Grande (in verde) nel quale confluiva anche il Canale d'Abisso (in blu). I Fontanazzi invece erano la principale sorgente delle acque del Canal Chiaro (in arancione) e del Canal Modonella (in rosa).

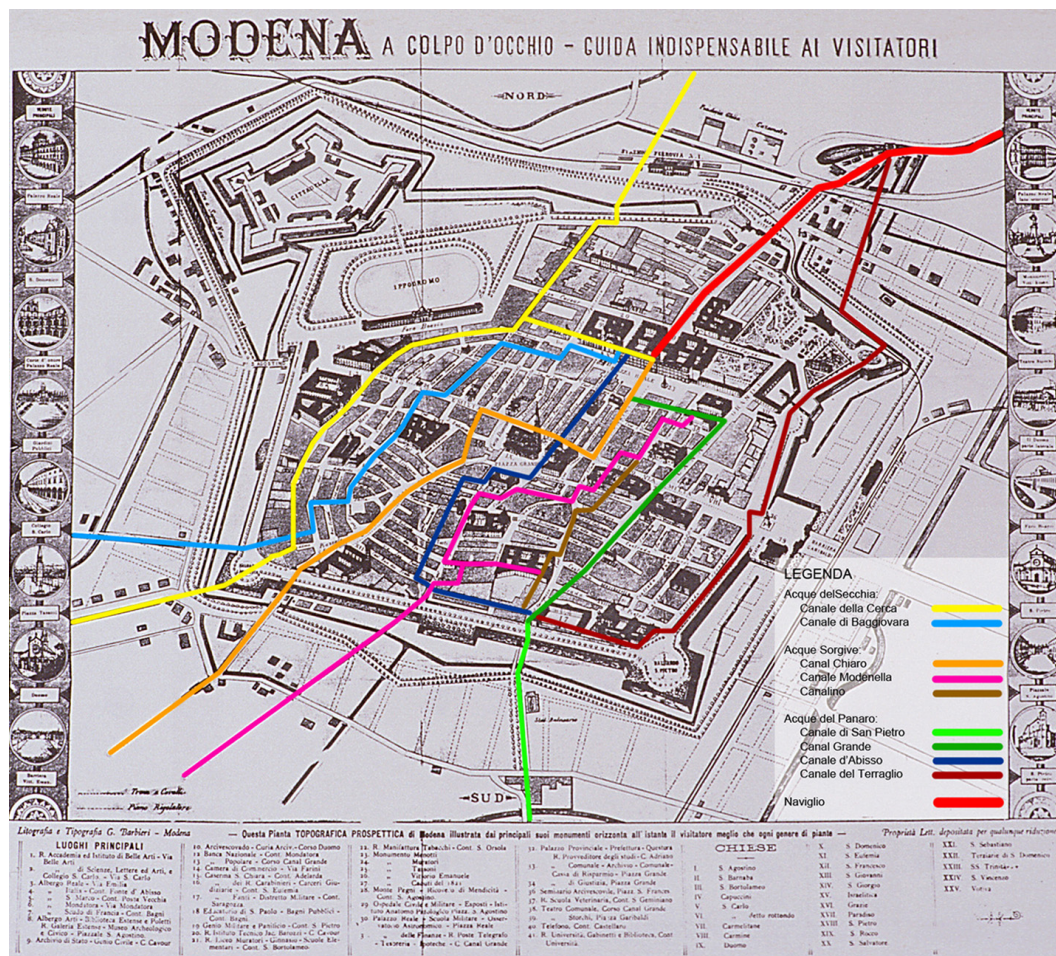


Figura 1.3 – I percorsi dei canali che attraversano il centro storico di Modena⁵

Per far spazio alla nuova struttura fortificata, che sorgeva a ridosso della parte settentrionale delle mura, è probabile che il Canal Grande fosse stato deviato per la contrada di Santa Margherita fin presso l'attuale via Fonteraso.

La posizione strategica del castello non solo permetteva un facile rifornimento di viveri e di materiali, ma costituiva anche una rapida via di fuga in caso di necessità, come avvenne nel 1306 quando gli Este furono cacciati dalla città in seguito ad un'insurrezione popolare. Durante gli anni della *Respublica Mutinensis* il primo castello estense fu demolito, ma in breve tempo i duchi ripresero il dominio della città e dal 1336 iniziarono i lavori di costruzione di un secondo castello nello stesso luogo in cui sorgeva il precedente. A partire dal 1598 Ferrara passò sotto il dominio dello Stato della Chiesa e Modena divenne la nuova capitale del Ducato Estense. In seguito alla costruzione della cittadella militare, il castello perse definitivamente ogni funzione difensiva e la sua destinazione d'uso venne progressivamente trasformata da presidio militare in palazzo di rappresentanza.

Il disegno di Lorenzo Confortini raffigura il castello di Modena così come doveva probabilmente apparire agli inizi del Cinquecento (figura 1.4):⁶

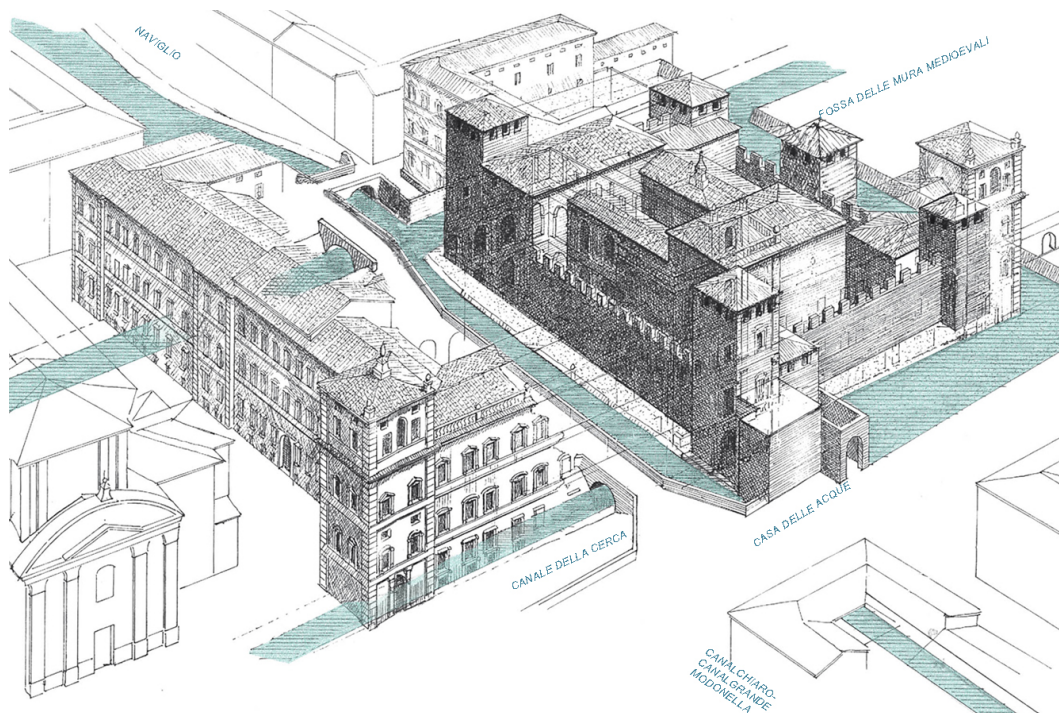


Figura 1.4 – Rappresentazione dell'attuale Accademia Militare di Modena affiancata alla ricostruzione del castello agli inizi del '500. Disegno di Lorenzo Confortini.

Tutti i canali urbani, sia quelli alimentati dalle acque risorgive chiare provenienti dai Fontanazzi, sia quelli di acque torbide provenienti dalle diramazioni dei fiumi e dagli scoli delle acque piovane, confluiscono gli uni negli altri in diversi punti della città fino a formare un unico corso d'acqua in prossimità del Palazzo Ducale: l'imboccatura del Naviglio è segnata dalla confluenza della Cerca nel Canal Grande, poco oltre il portone d'ingresso principale del palazzo. Prima delle trasformazioni urbanistiche cinquecentesche, l'innesto della Cerca nel Naviglio avveniva in corrispondenza dell'angolo sud-ovest del Palazzo Ducale, di fronte alla torre più alta. Il canale navigabile usciva poi dalle mura settentrionali attraverso un condotto in muratura e una volta oltrepassata Porta Albareto raggiungeva il porto di Modena, che nei disegni cinquecenteschi viene definito "porto vecchio".³ A causa della corrente, particolarmente forte nel punto di confluenza delle acque cittadine, è difficile che le barche di grandi dimensioni superassero il porto e arrivassero fino in città: molto probabilmente il Duca e la sua corte sbarcavano nel porto fuori le mura, entravano in carrozza da Porta Albareto e poi salivano nuovamente su fastose imbarcazioni da navigazione cittadina fino al palazzo. Per recuperare spazio edificabile in seguito allo sviluppo della città, tra il '500 e il '700 i canali vennero man mano voltati

(figura 1.5). La discontinuità di realizzazione dei vari tratti deriva dal fatto che la copertura era eseguita dai privati in cambio della concessione edilizia.³



Figura 1.5 – Canale voltato in Piazza Roma come appariva in una fotografia scattata nel 1943 durante i lavori di costruzione di un rifugio antiaereo.⁷

Inoltre il duca Francesco I fece realizzare un “nuovo porto” chiamato Darsena all’interno della città fortificata in corrispondenza dell’attuale via S. Orsola. La costruzione della ferrovia e della stazione velocizzarono il processo di sviluppo urbanistico di Modena: vennero iniziati i lavori per l’abbattimento delle mura, nel 1859 il Naviglio fu voltato e trasformato in Corso Vittorio Emanuele II e nel 1931 la darsena venne definitivamente interrata (figure 1.6, 1.7, 1.8).⁶ Le due attuali carreggiate di Corso Vittorio Emanuele II coincidono con le antiche strade del canale, che scorre sotto le aiuole spartitraffico.

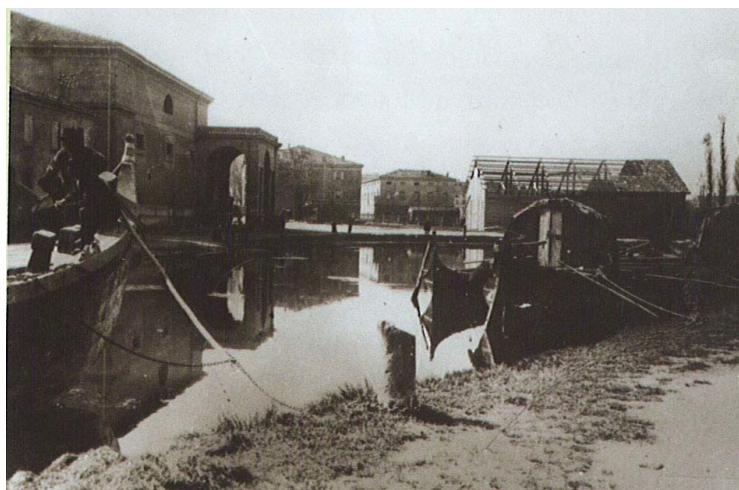


Figura 1.6 – Il Naviglio fuori porta castello: barconi ormeggiati nella darsena⁴



Figura 1.7 – Il Naviglio e la darsena nella seconda metà del '700⁶



Figura 1.8 – Corso Vittorio Emanuele II agli inizi del '900 dopo la copertura del Naviglio⁷

In quanto elemento matrice del sistema territoriale, i principali corsi d'acqua artificiali (Canal Grande, Canale d'Abisso, Canale Modonella, Canal Chiaro, Canale della Cerca, Canale di Baggiovara e Naviglio) sono sottoposti a tutela come manufatti d'interesse artistico o storico (in base alla Legge n. 1089 del 1939 sulla «Tutela delle cose di interesse artistico o storico») (figura 1.9).

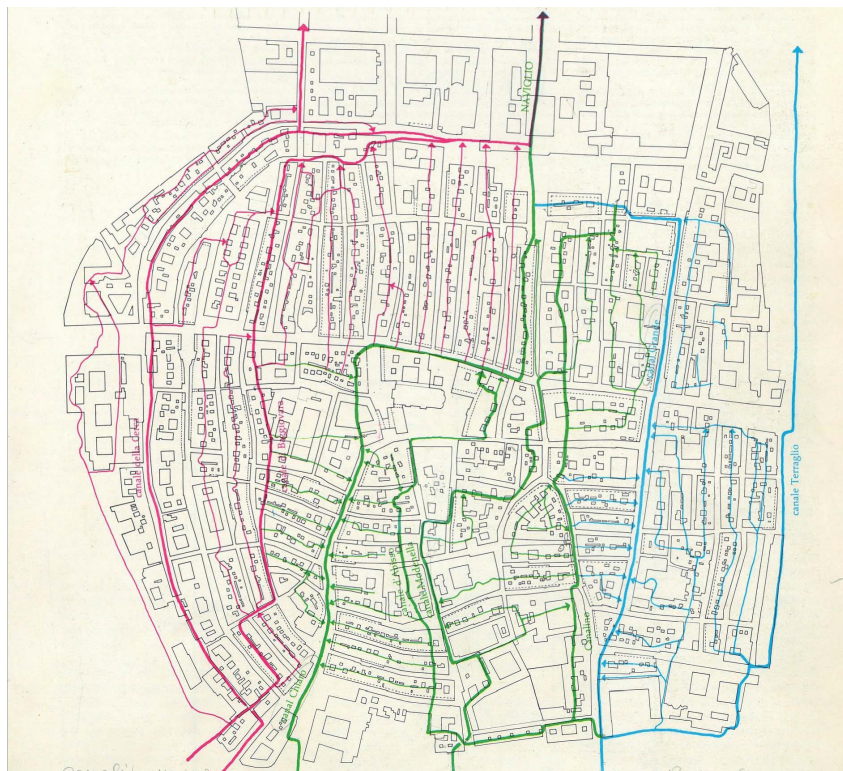


Figura 1.9 – Mappatura della rete idrografica principale (canali, indicati con spessore maggiore) e rete idrografica secondaria (bacini di scolo, indicati con spessore più sottile): in rosso sono individuati i corsi d'acqua provenienti dal fiume Secchia; in verde quelli alimentati dalle acque sorgive dei Fontanazzi; in blu quelli derivanti dal Panaro.⁶

1.3 I perimetri delle antiche fortificazioni e le trasformazioni urbanistiche

Attorno al 217 a.C., durante la conquista della Gallia Cisalpina, alcuni triumviri romani dovettero fronteggiare una rivolta dei Galli Boi: trovarono quindi rifugio in un centro abitato fortificato che trasformarono in *castrum*.¹ La città romana di *Mutina*, sviluppata nel luogo in cui era posto il *castrum*, ne mantenne intatta la configurazione iniziale e il tessuto urbanistico.

Secondo quanto riporta lo storico ottocentesco Paolo Borghi, l'*oppidum mutinense* aveva forma pressoché quadrata: la sua lunghezza era di 2050 piedi (607,21 m) e la sua larghezza era di 2017 piedi (599,43 m).⁸

Il perimetro e l'organizzazione dell'area urbana di età repubblicana sono stati ricostruiti tramite il confronto con l'urbanistica di Parma, colonia romana fondata nello stesso periodo di *Mutina*, e sulla base della distribuzione dei rinvenimenti archeologici delle necropoli che, secondo la prassi urbanistica dei Romani, dovevano essere sempre collocate fuori dalle mura. La città era organizzata probabilmente in isolati di un actus e mezzo (corrispondenti a circa 53-54 m), modulo identico a quello riscontrato a Parma. Il confine orientale correva lungo l'asse delle attuali vie Trento-Trieste e Ciro Menotti, ed era lambito da un antico corso del torrente Tiepido. Il lato occidentale coincideva con il lato est di piazza Grande, dove parallelo alle fortificazioni correva il Canale d'Abisso. A sud il limite urbano corrispondeva all'attuale via Mascherella, mentre a nord attraversava Piazza Roma.⁹

La decadenza dell'impero romano, le invasioni barbariche e le frequenti alluvioni provocarono a più riprese la rovina e la devastazione della città: rimase abitato soltanto il nucleo sorto attorno alla chiesa costruita nel 397 d.C. dal vescovo Teodoro sulla tomba di San Geminiano.¹ Il 22 novembre 891 il vescovo di Modena Leodonino ottenne da Guido di Spoleto, da poco incoronato re d'Italia, il possesso dell'area urbana antica e del territorio necessario alla fortificazione della cattedrale e dell'insediamento circostante.⁹ Le mura avevano un perimetro di circa 1500 m ed il fossato di cinta era costituito a nord-ovest dal Canalchiaro e a sud-est dal canal Modonella. Per ragioni strategiche di sicurezza e di transito la via Emilia venne lasciata esterna al nucleo della città del X secolo.¹⁰

Lo sviluppo urbano sotto la tutela vescovile tra X e XI secolo si attuò secondo un ordinato piano di lottizzazioni "per strigas", ad andamento curvilineo e ortogonale rispetto allo scorrimento delle acque. Nella seconda metà del XI secolo il vescovo Eriberto fece costruire un secondo circuito difensivo (1071-1091), probabilmente in muratura, e il Naviglio, per collegare la città al Po e a Ferrara.⁹ La potenza vescovile si consolidò ulteriormente con la fondazione della cattedrale (1099): l'abitato si estese notevolmente sulle aree paludose a sud-ovest e a nord-est, oltre la via Emilia, con un piano di lottizzazione regolare.

L'incremento dei traffici commerciali con Ferrara e Lucca e lo sviluppo demografico resero necessario un ulteriore ampliamento del circuito murario attuato a partire dal 1188, sotto il podestà Manfredo Pico. Nel corso del '200 troverà una definitiva sistemazione la grande piazza pubblica, concepita per valorizzare la cattedrale, ma nella quale emergerà gradualmente il polo comunale.⁹ La terza sede del potere, quello militare, sorgerà nel 1289, isolata rispetto alla maglia urbana, al margine settentrionale dell'abitato.¹¹ Sul piano monumentale la città si trasformò in modo decisivo con la costruzione del castello estense di Obizzo II a partire dal 1289, mentre l'edilizia comune subì modificazioni lente e poco influenti sull'assetto urbanistico soprattutto a causa dell'inalterabilità del sistema di corsi d'acqua.⁹ Durante

tutto il medioevo il tessuto viario, plasmato dal corso dei canali, si articolò in percorsi curvilinei tra quinte di case porticate. Un ulteriore ampliamento del perimetro murario si ebbe tra il 1323 e il 1381 ad opera di Passerino Bonaccolsi, signore di Mantova, in seguito alla momentanea cacciata degli Este.¹¹ Il perimetro delle mura trecentesche rimase quindi quasi identico a quello del 1188 ma tra porta e porta furono costruite delle torrette e dei piombatoi.¹⁰

La città dei primi decenni del '500 si sviluppò sulle linee guida medievali con poche e frammentarie riqualificazioni di singoli edifici gentilizi ed ecclesiastici. Nel 1546 Ercole d'Este ampliò il perimetro delle mura e progettò alle spalle della chiesa di S. Domenico l'Addizione Erculea, un vero e proprio nuovo tessuto urbano a maglia ortogonale, con isolati di dimensioni maggiori e percorsi ampi e rettilinei che contrastavano con il volto della città medievale. La nuova cerchia muraria aveva quattro porte, numerosi bastioni e terrapieni e includeva parte del canale Naviglio, permettendo l'imbarco e lo sbarco delle merci direttamente all'interno della città. La maglia viaria dell'Addizione Erculea era impostata molto più regolarmente di quella della città medievale: gli isolati, di dimensioni maggiori, erano interessati da vie ampie e spaziose secondo un tracciato quasi ortogonale.¹ Dal 1598, con il trasferimento della corte estense, Modena diventò capitale del ducato: il fulcro del potere cittadino si spostò da Piazza Grande all'estremità nord orientale della città, dove l'antico castello venne man mano trasformato in palazzo ducale. Per collegare i due principali poli di rappresentanza venne rettificato il tracciato stradale di Canalgrande e vennero riqualificati gli edifici civili che si affacciavano sulle strade più importanti.

Le prime documentazioni planimetriche di Modena risalgono alla seconda metà del '600: del 1684 è la prima pianta abbastanza attendibile dell'intera città e delle sue fortificazioni. La pianta disegnata dal Boccabadati, oltre a segnare i canali e il tessuto urbano, indica le proprietà o le destinazioni d'uso di gran parte degli edifici.¹ Il duca Francesco I attuò un programma urbanistico contemporaneo alla costruzione del Palazzo Ducale: la creazione dei giardini estensi con la palazzina ducale, la progettazione di un teatro, la riorganizzazione delle strutture difensive concentrate nella cittadella a pianta stellare, la realizzazione della darsena lungo il Naviglio.¹¹

Un'imponente riforma dei servizi e della maglia stradale fu promossa da Francesco III, duca dal 1737 al 1780, per conferire alla città il carattere di moderna capitale europea. Si lavorò al rifacimento delle quinte edilizie lungo la via Emilia e alla costruzione dell'Ospedale Estense, del Palazzo dell'Università, dell'Orto Botanico, del Teatro Anatomico. Si impose con maggiore evidenza l'attenzione verso l'elemento naturalistico rappresentato dai giardini, dai viali alberati e dall'Orto Botanico. Questi spazi erano non più appendici degli edifici, ma elementi capaci di integrarsi ed influenzare le soluzioni architettoniche.¹¹ Se si esclude la costruzione della cittadella, la cinta muraria dovuta a Ercole II rimase inalterata fino al suo definitivo abbattimento avvenuto tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo.

1.3 I perimetri delle antiche fortificazioni e le trasformazioni urbanistiche

Si riporta lo schema sintetico della progressiva crescita della città evidenziata dai successivi ampliamenti delle cinte murarie (figura 1.10):

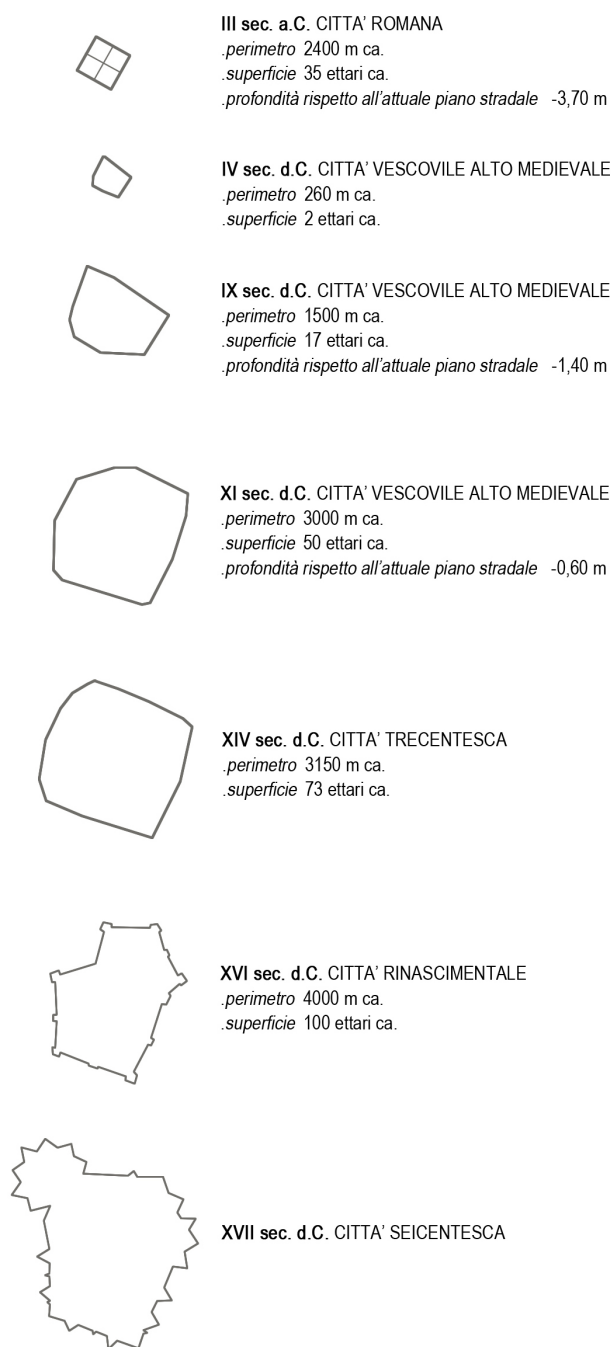


Figura 1.10 – Ipotesi ricostruttiva dei perimetri delle antiche fortificazioni¹²

Nel 1807, in regime napoleonico, venne costituita una Commissione d'Ornato della Città, per esercitare un controllo urbanistico unitario. Dopo la caduta di Napoleone, il duca Francesco IV diede il via ai lavori di copertura del Naviglio nel tratto interno alle mura a favore della ferrovia. Il duca Francesco V ordinò di risistemare selciati e facciate dell'attuale Corso Vittorio Emanuele II e fece costruire una Barriera in sostituzione dell'antica Porta Castello, troppo modesta per sostenere il previsto (ma mai realizzato) ruolo di accesso ferroviario alla città. In quegli anni la popolazione aumentò fino a 20000 abitanti e iniziò l'espansione urbanistica nella prima periferia: ciò comportò l'abbattimento delle mura e la loro sostituzione con i viali alberati di circonvallazione.¹

Nel 1893 e nel 1911 furono realizzati i primi Piani Regolatori cittadini, nei quali si proponeva il risanamento di alcune zone del centro e fuori le mura: oltre alla costruzione dei viali, si prevedeva la realizzazione di un servizio tramviario e di una rete elettrica in sostituzione dell'illuminazione a gas. La città storica iniziò a configurarsi sempre più come il centro dei servizi, mentre la funzione residenziale si spostò man mano verso la prima periferia soprattutto nelle zone a sud, est e ovest della città; nella zona a nord, in corrispondenza della ferrovia e della stazione, si stabilirono le funzioni produttive e industriali. L'attuazione dei Piani Regolatori fu interrotta dallo scoppio della prima guerra mondiale.¹

Con l'avvento del fascismo si ebbe il fenomeno dell'inurbamento delle popolazioni rurali e nel 1923-25 venne approvato un piano di risanamento che comprendeva l'abbattimento di diversi isolati, la sistemazione delle fognature e la copertura in periferia del Naviglio.¹ Oltre a riparare i danni provocati dalle distruzioni belliche con una diffusa azione di restauro, l'amministrazione attuò una serie di trasformazioni per modernizzare il centro cittadino: l'apertura di piazze, la realizzazione di portici e allineamenti stradali.¹³ Il regime scelse come sede del Fascio modenese l'imponente Palazzo Coccapani lungo Corso Vittorio Emanuele II, rafforzando così l'idea di continuità con il simbolo del potere politico e militare su Modena, il Palazzo Ducale.

Durante la seconda guerra mondiale, in occasione della costruzione di un rifugio antiaereo, vennero ritrovati in Piazza Roma i resti di un tratto delle mura settentrionali della città romana di età repubblicana.¹⁴

Il Piano di Ricostruzione adottato a Modena nel 1947 non regolamentò in modo efficace la crescita della città e le aree libere della prima periferia vennero lottizzate seguendo la logica del riempimento spontaneo di suolo edificabile.¹⁵

Con il boom edilizio successivo al secondo dopoguerra si ebbe il progressivo emergere di testimonianze monumentali relative alle necropoli lungo la via Emilia e di rinvenimenti archeologici in Piazza Mazzini (1932) e in Piazza Matteotti (1947). Nei primi anni '50 i tram furono sostituiti dai filobus: le ultime a essere smantellate furono le rotaie della linea "interstazionale" che collegava la stazione centrale con quella provinciale passando di fronte al Palazzo Ducale, diventato nel 1947 sede dell'Accademia Militare.

Il Piano Regolatore Generale del 1958 rappresentò il primo tentativo di applicazione a Modena della Legge urbanistica nazionale del 1942, dal momento che quest'ultima era stata messa in moratoria dopo la guerra in favore dei piani di ricostruzione. Il limite di questo piano, però, fu quello di considerare il centro storico come una parte di città a sé stante, i cui problemi di congestionamento e degrado edilizio andavano risolti al suo interno con interventi puntuali.¹⁵ In opposizione al Piano del 1958, il PRG del 1975 ebbe un approccio urbanistico a dimensione territoriale: si puntò a riequilibrare le differenze di "peso" tra il centro, che si era caratterizzato fino a quel momento come il nucleo direzionale, amministrativo, culturale ed economico, e la prima periferia, che aveva assunto principalmente la funzione residenziale. La scelta di contenuto più rilevante operata da questo piano fu quella di delocalizzare dal centro storico alcune funzioni terziarie per creare una diffusione della città più omogenea. Vennero previsti, inoltre, spazi verdi di penetrazione dalla periferia fino al centro storico e venne ridefinito il sistema di viabilità: si cercò di far diminuire piano piano l'attraversamento carrabile del centro storico dirottando il traffico sui viali di circonvallazione. Il PRG del 1975 fu orientato, infatti, a preparare il terreno per l'intervento di recupero del centro storico di Pier Luigi Cervellati, che pose l'attenzione progettuale non solo sugli edifici monumentali ma anche sulla riqualificazione diffusa del tessuto edilizio minore. Il piano di recupero del 1987, specifico per il centro storico, fu quindi teso a riqualificare il nucleo urbano nella sua totalità, a regolare l'accesso carrabile e a migliorare la qualità ambientale riducendo drasticamente l'inquinamento acustico e atmosferico dovuto al traffico. Questi obiettivi di salvaguardia del centro storico furono sostanzialmente recepiti e sviluppati nel Piano del Traffico e della Mobilità del 1991 e nel Piano della Sosta nelle Aree Centrali del 1998. Con questi strumenti si presero ulteriori misure per limitare la circolazione veicolare estendendo le zone a traffico limitato e creando aree pedonali.¹⁵

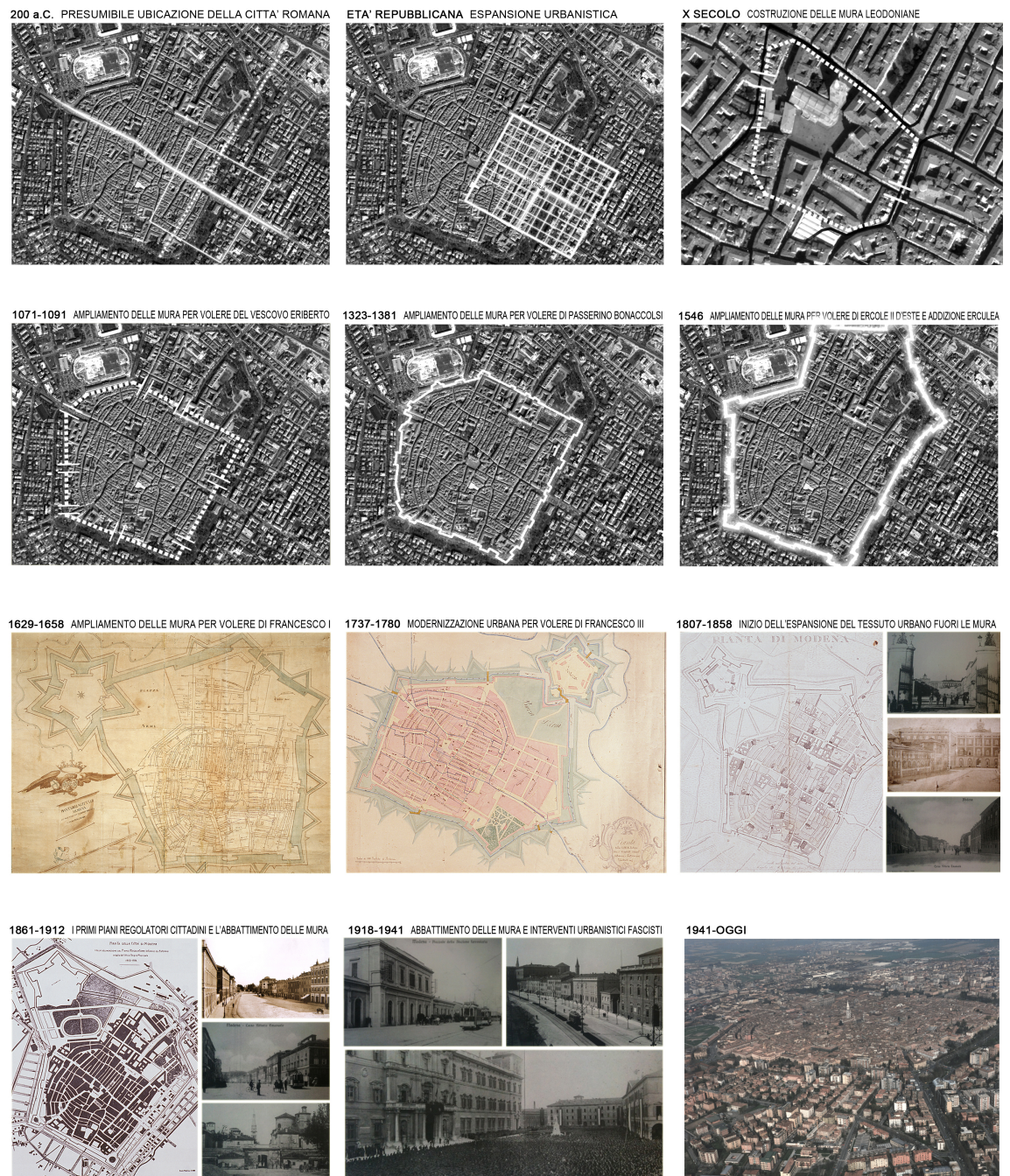


Figura 1.11 – Sviluppo urbanistico di Modena dalla fondazione della città romana ad oggi^{5,7,6}

2 IL PIANO DI RIQUALIFICAZIONE DEL CENTRO STORICO

2.1 Gli obiettivi del nuovo piano

L'entrata in vigore nel 2006 dei concetti normativi per la qualità urbana, che attuano i principi esposti nella Convenzione Europea del Paesaggio, ha indirizzato l'amministrazione comunale alla valorizzazione del centro storico come bene culturale e paesaggio urbano. A partire dal 2010, in base a quanto contenuto nel *Testo coordinato delle norme di PSC-POC-RUE*, il Comune ha provveduto a effettuare un'accurata attività conoscitiva di tutti gli spazi pubblici e delle strade contenuti all'interno del perimetro del centro storico, disciplinando gli interventi da eseguire al fine di salvaguardare la qualità ambientale, tutelare e valorizzare il tessuto storico, rivitalizzare e rifunionalizzare il patrimonio edilizio.¹⁶

Il proposito principale del nuovo piano è stato quindi «la riqualificazione dell'esistente attraverso una cultura di intervento capace di coniugare attivamente la memoria e l'innovazione, le ragioni della conservazione e del mutamento, del progetto e non solo del vincolo».¹⁵

Per affrontare la riqualificazione in modo efficace e consapevole è stato necessario, quindi, realizzare un Quadro Conoscitivo preliminare all'elaborazione dei temi progettuali, redatto a cura dell'Arch. Irma Palmieri in qualità di funzionario progettista e coordinatore dei gruppi di lavoro. Il Quadro Conoscitivo è stato strutturato in analisi tematiche frutto di contributi intersettoriali fra enti tecnici comunali (Settore di Pianificazione Territoriale, Trasporti e Mobilità; Settore di Manutenzione e Logistica; Settore Affari Generali e Istituzionali; Settore Cultura; Settore Ambiente ed Energia), enti culturali (Archivio Storico Comunale; Biblioteca Civica d'Arte Poletti; Museo Archeologico Etnologico; Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici dell'Emilia Romagna; Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici per le province di Bologna, Modena e Reggio Emilia; Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Emilia Romagna) e aziende (Hera Luce Modena srl).

Dal 2010 al 2012 sono state portate avanti ampie ricerche storico-archivistiche, documentarie e bibliografiche e successivamente sono stati analizzati i progetti urbanistici e i Piani Regolatori degli ultimi 40 anni, prendendo come punto di riferimento, perchè specifica sul centro storico, la Variante di Piano Regolatore del 1989.

Alla fase conoscitiva si è succeduta la fase propositiva del piano, con l'individuazione degli obiettivi da raggiungere:

- un sistema di pedonalizzazioni graduali al fine di attenuare il traffico veicolare sulle strade del centro storico;
- una rivitalizzazione della passeggiata delle mura che collega ad anello gli ingressi pedonali alla città storica;
- una separazione di traffico pubblico e privato in modo che l'accessibilità car-rabile per i residenti, seppur necessaria, non ostacoli la fruibilità pedonale del centro storico.

Per quanto riguarda in particolar modo il progetto delle nuove pavimentazioni stradal, sono state approfondite proposte progettuali di massima che puntano alla valorizzazione dell'identità storica e morfologica del centro storico, alla salvaguardia della permeabilità dei selciati attraverso l'uso dei materiali tradizionali lapidei, al recupero dei cromatismi della tradizione locale, alla fruizione pedonale e ciclabile della città storica.¹⁶

2.2 Il precedente Piano di Recupero e Riqualificazione del centro storico: il Progetto Cervellati recepito nella Variante al P.R.G. del 1989

Dalla seconda metà del Novecento a oggi vi sono state spesso in Emilia-Romagna importanti esperienze di pianificazione urbanistica: un esempio di grande interesse e di avanguardia a livello nazionale è stato il Piano di Recupero del Centro Storico di Bologna, redatto da un gruppo di lavoro coordinato dall'architetto Pier Luigi Cervellati. Il piano, contenuto all'interno del Piano Regolatore Generale del 1970, aveva l'obiettivo di risanare alcune aree degradate del centro storico salvaguardando e diffondendo una diversa coscienza verso il patrimonio urbanistico della città.¹⁷ L'approccio alla progettazione della città e alla politica urbanistica era estremamente innovativo, in quanto ci si concentrava non più soltanto sul restauro dei singoli monumenti, ma sul recupero di tutto il centro storico concepito come un'unica entità di grande valore. Il principio del restauro conservativo venne quindi inteso come conoscenza del passato per una migliore progettazione del futuro. Inoltre venne realizzata una delle prime esperienze di urbanistica partecipata in quanto l'amministrazione comunale inserì fra i progettisti i "consigli di quartiere" e fra i collaboratori le "commissioni urbanistiche di quartiere", promuovendo così la partecipazione dei cittadini.¹⁷

Ispirandosi alla vicenda bolognese, negli anni successivi in Emilia-Romagna si portò avanti una pianificazione continua delle città e del loro territorio che produsse una maggiore consapevolezza nella conservazione del patrimonio esistente. Tuttavia negli anni '80 furono necessarie nuove proposte di pianificazione urbanistica per i centri storici poiché ai classici temi della qualità dello spazio abitativo e del recupero di aree degradate si aggiunsero i problemi legati alla congestione del traffico,

2.2 Il precedente Piano di Recupero e Riqualficazione del centro storico: il Progetto Cervellati recepito nella Variante al P.R.G. del 1989

alla mobilità collettiva e allo spopolamento del centro storico a favore delle aree periferiche. Con gli anni '70 si arrestò l'espansione urbana e l'amministrazione comunale si interessò alla qualità urbanistica della città esistente: il centro storico si pose quindi come ambito privilegiato di progetti di conservazione, adeguamento, trasformazione e recupero.

Anche a Modena alla fine degli anni '80 l'amministrazione comunale cercò di superare la politica di intervento sui singoli edifici, puntando invece a qualificare il centro storico nella sua integralità valorizzandone il rapporto col territorio. Gli obiettivi principali del Piano Regolatore Generale di Modena del 1989, sviluppato con il contributo di Pier Luigi Cervellati, erano:¹⁸

1. l'incremento della funzione residenziale nel centro storico per contrastare la tendenza al calo demografico attraverso la promozione dell'iniziativa privata e gli incentivi alla realizzazione di ascensori e autorimesse;
2. la limitazione della circolazione delle auto, la creazione di aree pedonali, il miglioramento dell'accessibilità dalle zone esterne per migliorare la qualità ambientale del centro e ridurre l'inquinamento da traffico.

Lo stesso Cervellati, infatti, nella relazione di introduttiva al progetto descriveva un "nuovo degrado"

«risultato della combinazione di due fattori, la congestione e l'abbandono, a cui è contestualmente sottoposto il centro storico, aggredito dall'assalto dei veicoli motorizzati, dall'essere il luogo deputato per l'attrazione commerciale e consumistica, mentre invecchia la sempre più scarsa presenza della componente residenziale»¹⁹

L'insieme di interventi previsti per affrontare il problema del nuovo degrado consisteva nel recupero e nella ricomposizione delle facciate su Via Emilia, nella ridefinizione dei materiali di pavimentazione e dell'illuminazione di via Emilia, nella riorganizzazione funzionale del Palazzo Comunale, nel recupero e nella riqualificazione degli spazi pubblici del centro storico costituiti da Piazza Grande, Piazza Mazzini e Piazza XX Settembre (figura 2.1).

La priorità al fine della riqualificazione degli spazi pubblici era la previsione di zone di parcheggio limitrofe al centro per contenere il traffico di attraversamento e la presenza di automobili. Inoltre gli interventi dovevano estendersi anche a piazze, strade e componenti di arredo urbano in quanto elementi di connessione fra il tessuto edilizio e le architetture di pregio.¹⁵

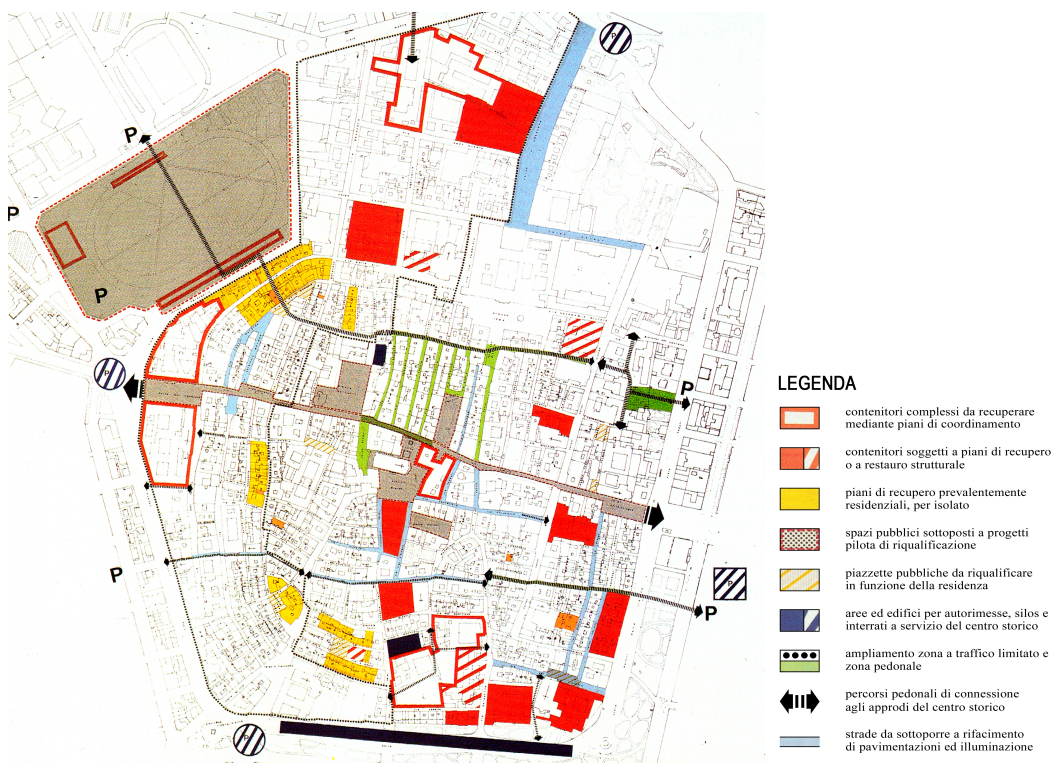


Figura 2.1 – Previsioni programmatiche e tipologie di intervento nel centro storico (P.R.G. 1987)¹⁸

2.3 Il Quadro Conoscitivo vigente sulla mobilità del centro storico di Modena

Attualmente i problemi di spopolamento e abbandono del centro storico che erano stati individuati negli anni '80 risultano in via di superamento: il centro storico è oggetto di grande interesse sociale, culturale ed economico grazie alla progressiva riqualificazione del patrimonio edilizio e stradale, ed alla realizzazione di diverse iniziative che promuovono la frequentazione degli spazi pubblici. Il centro storico sta man mano tornando a essere un polo attrattivo in termini di offerta non solo commerciale, ma anche residenziale e turistica: in questo modo però esso esercita un forte richiamo nei confronti del traffico veicolare, che mal coesiste con le dimensioni e le caratteristiche delle strade. Uno dei problemi più critici per il centro storico, infatti, rimane quello della mobilità: la gestione del traffico, la presenza di parcheggi e l'accessibilità sostenibile tramite mezzi pubblici e trasporto ciclabile.

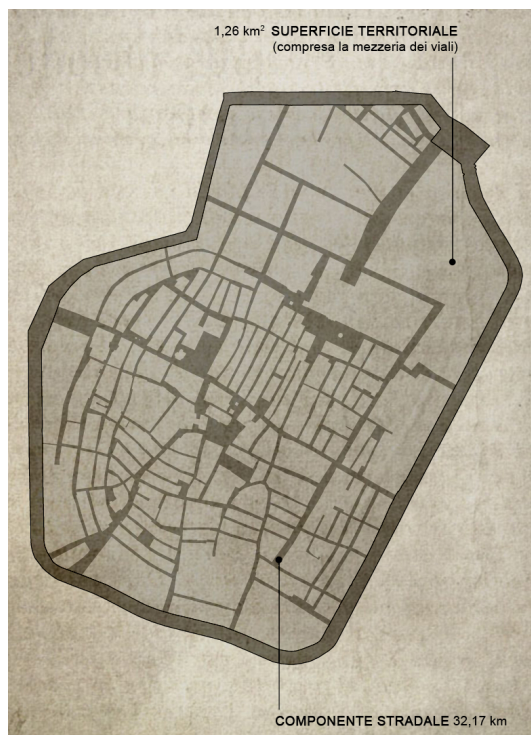


Figura 2.2 – Le dimensioni del centro storico di Modena

2.3.1 La classificazione delle strade e delle zone di traffico

In base a quanto stabilito dal Codice della Strada le strade si classificano nelle tipologie indicate in tabella 2.1:

	AMBITO TERRITORIALE		LIMITE DI VELOCITA' (km/h)
Autostrada (A)	extraurbano	principale	130
		di servizio	90
	urbano	principale	130
		di servizio	50
Strada extraurbana principale (B)	extraurbano	principale	110
		di servizio	90
Strada extraurbana secondaria (C)	extraurbano	C1, C2	90
Strada urbana di scorrimento (D)	urbano	principale	70
		di servizio	50
Strada urbana di quartiere (E)	urbano		50
Strada locale (F)	extraurbano	F1, F2	90
	urbano		50

Tabella 2.1 – D.M. 5/11/2001 - Capitolo 3: Classificazione delle strade

La classificazione delle strade del Comune di Modena attualmente in vigore è stata approvata nel 2010 con delibera della Giunta Comunale (figura 2.3).



Figura 2.3 – Classificazione delle strade del centro storico di Modena

Con l'attuazione del Piano di Riorganizzazione della Sosta nelle Aree Urbane Centrali, approvato nel 2008, sono state individuate 6 differenti zone di traffico nell'area del centro storico (figura 2.4):²⁰

- ZTL - ZONA A TRAFFICO LIMITATO: questa zona, della quale fa parte circa il 70% del centro storico, corrisponde alla parte più antica della città, dove sono concentrate le attività commerciali tradizionali e dove le strade strette e l'elevata presenza di abitazioni impedisce la libera circolazione del traffico cittadino;
- ZLC - ZONA A LIBERA CIRCOLAZIONE E SOSTA LIMITATA: è il restante 30% del centro storico, di costruzione più recente rispetto alla zona a traffico limitato, che, per l'assenza di attività commerciali, esercita una minore attrazione;

2.3 Il Quadro Conoscitivo vigente sulla mobilità del centro storico di Modena

- VIALI DI CIRCONVALLAZIONE: zona a libera circolazione e sosta regolamentata;
- MARGINI DELLA PRIMA PERIFERIA: zona a libera circolazione in cui la quantità di parcheggi disponibili non rende necessaria nessuna regolamentazione della sosta;
- PARCHEGGIO EX AMCM: parcheggio a sosta non regolamentata con una buona disponibilità di posti auto e da cui si raggiunge velocemente la zona sud del centro storico;
- VIALE MEDAGLIE D'ORO: zona a libera circolazione e sosta regolamentata a partire dall'agosto 2012, importante accesso al centro da sud est e asse di connessione con la stazione ferroviaria provinciale.

Per completezza di analisi, l'amministrazione comunale ha preso in considerazione nei rilievi non solo il centro storico all'interno del perimetro dei viali di circonvallazione, ma anche la fascia di prima periferia.

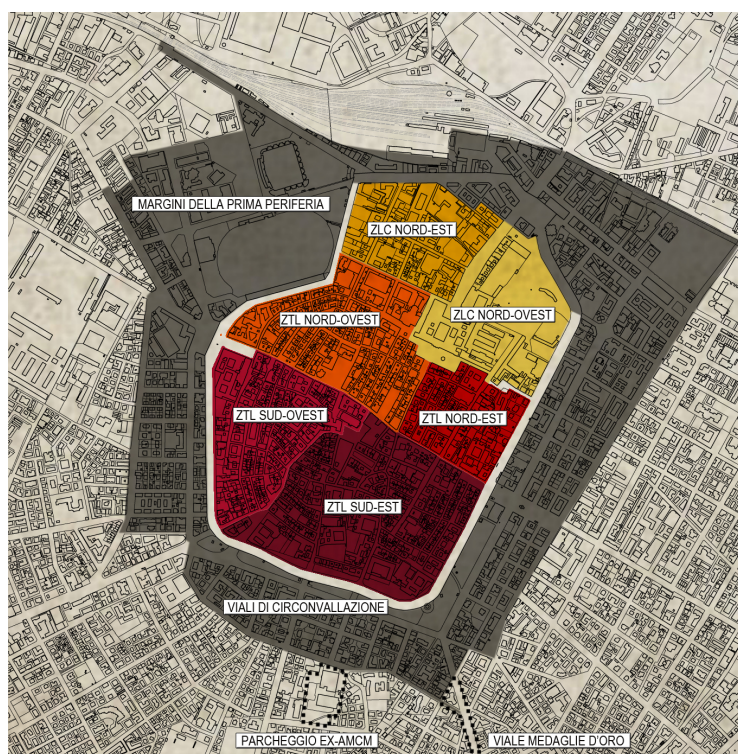


Figura 2.4 – Zone di analisi della sosta²⁰

Per quanto riguarda la sosta, è stato effettuato il rilievo dell'occupazione oraria dei parcheggi tra le 6.00 e le 20.00: l'occupazione di posti auto nel centro storico è massima nelle ore notturne, diminuisce in mattinata e aumenta nuovamente durante le ore serali (figura 2.5).

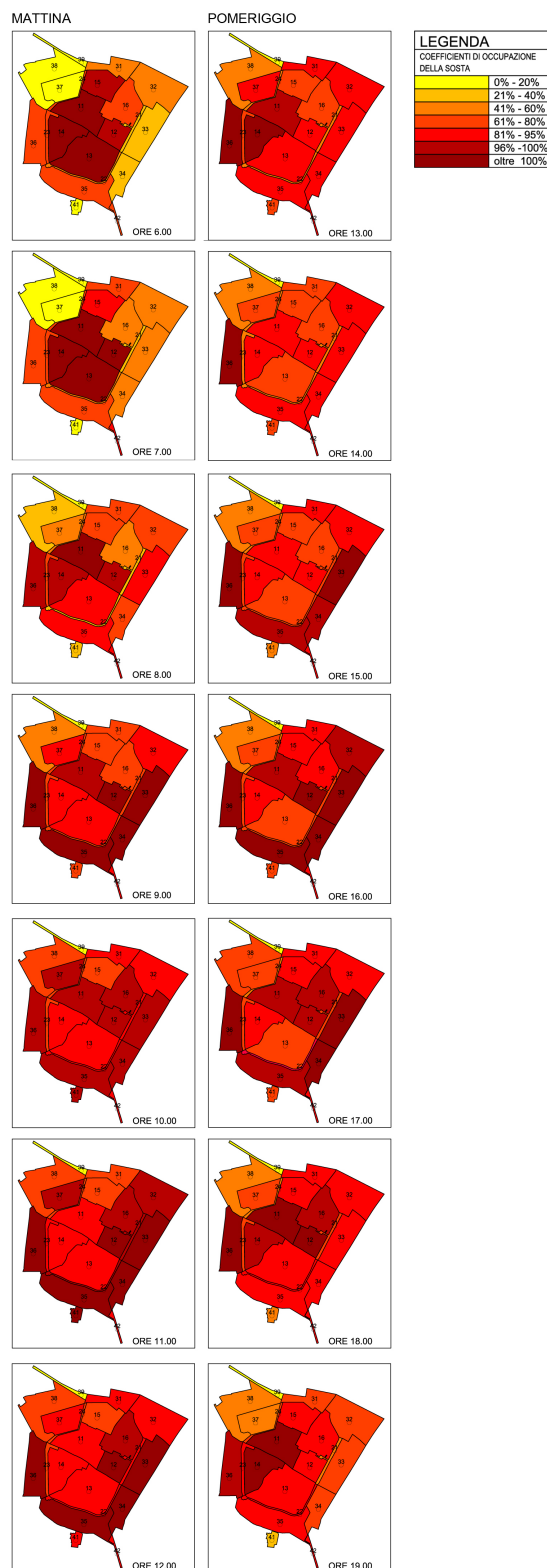


Figura 2.5 – Rilievo dell'occupazione degli spazi di sosta²⁰

2.3.2 Il sondaggio di opinione del 2013 sullo sviluppo urbanistico

Nell'ottica di una pianificazione urbanistica partecipata da parte dei cittadini, il Settore di Pianificazione Territoriale nel 2013 ha condotto un sondaggio di opinione sulla percezione dello sviluppo urbanistico della città attraverso il metodo delle interviste, sia online, sia telefoniche. La rappresentatività del campione è illustrata nello schema riassuntivo delle caratteristiche socio-anagrafiche degli intervistati (figura 2.6):

CARATTERISTICHE SOCIOANAGRAFICHE CAMPIONE		
Genere	n	%
Maschio	672	47,2
Femmina	751	52,8
Totale	1423	100
Età	n	%
18-24	100	7
25-34	150	10,6
35-44	237	16,7
45-54	259	18,2
55-64	226	15,9
65 e oltre	451	31,7
Totale	1423	100
Professione	n	%
autonomo	157	11
dipendente	568	39,9
studente	81	5,7
casalinga	48	3,4
pensionato	499	35,1
non occupato	71	5
Totale	1423	100
Titolo di studio	n	%
Fino a licenza elementare	195	13,7
Licenza media inferiore	313	22
Diploma di scuola professionale (2/3 anni)	93	6,5
Diploma di scuola media superiore/maturità (5 anni)	509	35,8
Laurea primo livello (3 anni)	58	4,1
Laurea magistrale (5 anni) o vecchio ordinamento	255	17,9
Totale	1423	100
Zona di residenza	n	%
circoscr.1 - Centro Storico/San Cataldo	161	11,3
circoscr.2 - Albaretto/Navicello/San Matteo)	29	2
circoscr.2 - Crocetta/Sacca/Torrazzi	185	13
circoscr.2 - Modena Est/Fossalta (a nord della via Emilia)	150	10,5
circoscr.3 - Modena Est/Fossalta/San Lazzaro/Saliceto Panaro (a sud della via Emilia)	83	5,8
circoscr.3 - Buon Pastore/Sant'Agnese/Vaciglio/Zona Universitaria	344	24,2
circoscr.3 - San Damaso/Collegara/San Donnino	30	2,1
circoscr.3 - Portile/Paganine/Mugnano	26	1,8
circoscr.4 - Baggiovara/Cogmento	42	3
circoscr.4 - San Faustino/Saliceto San Giuliano/Villaggio Giardino/Villaggio Zeta	235	16,5
circoscr.4 - Madonnina/Tre Olmi/Ponte Alto	87	6,1
circoscr.4 - Bruciata/Cittanova/Marzaglia	26	1,8
circoscr.4 - Quattro Ville/Villanova/Le Signana/Ganaceto/Ca' Fusara	26	1,8
Totale	1423	100

Figura 2.6 – Caratteristiche socio-anagrafiche del campione intervistato²¹

Secondo il sondaggio le zone in cui si vive meglio a Modena sono la prima periferia (43,5%), le frazioni (29%) e i nuovi quartieri residenziali (14,9%), come ad esempio il Villaggio Giardino o il comparto PEEP nei pressi del centro commerciale La Rotonda. Il centro storico invece è indicato come zona più vivibile solo dal 7,5% degli intervistati. Le possibili soluzioni, emerse dal sondaggio, per migliorare la qualità dell'ambiente urbano sono soprattutto la diminuzione del traffico e dell'inquinamento (ottenibile con una maggiore accessibilità pedonale, ciclabile e di trasporto pubblico), un aumento di spazi verdi e servizi e un miglioramento delle condizioni delle abitazioni. Si riportano in figura i risultati relativi ad alcune delle domande propo-

ste: in particolare si evidenzia l'opinione positiva della maggioranza degli intervistati (59,4%) sul previsto intervento di pedonalizzazione di Piazza Roma. Entrando nel merito della progettazione del nuovo spazio pedonale, il 56% degli intervistati preferirebbe una piazza dotata di verde, acqua e fontane, il 12% soltanto di acqua e fontane, mentre il 23% vorrebbe lasciare la piazza completamente libera (figura 2.7).

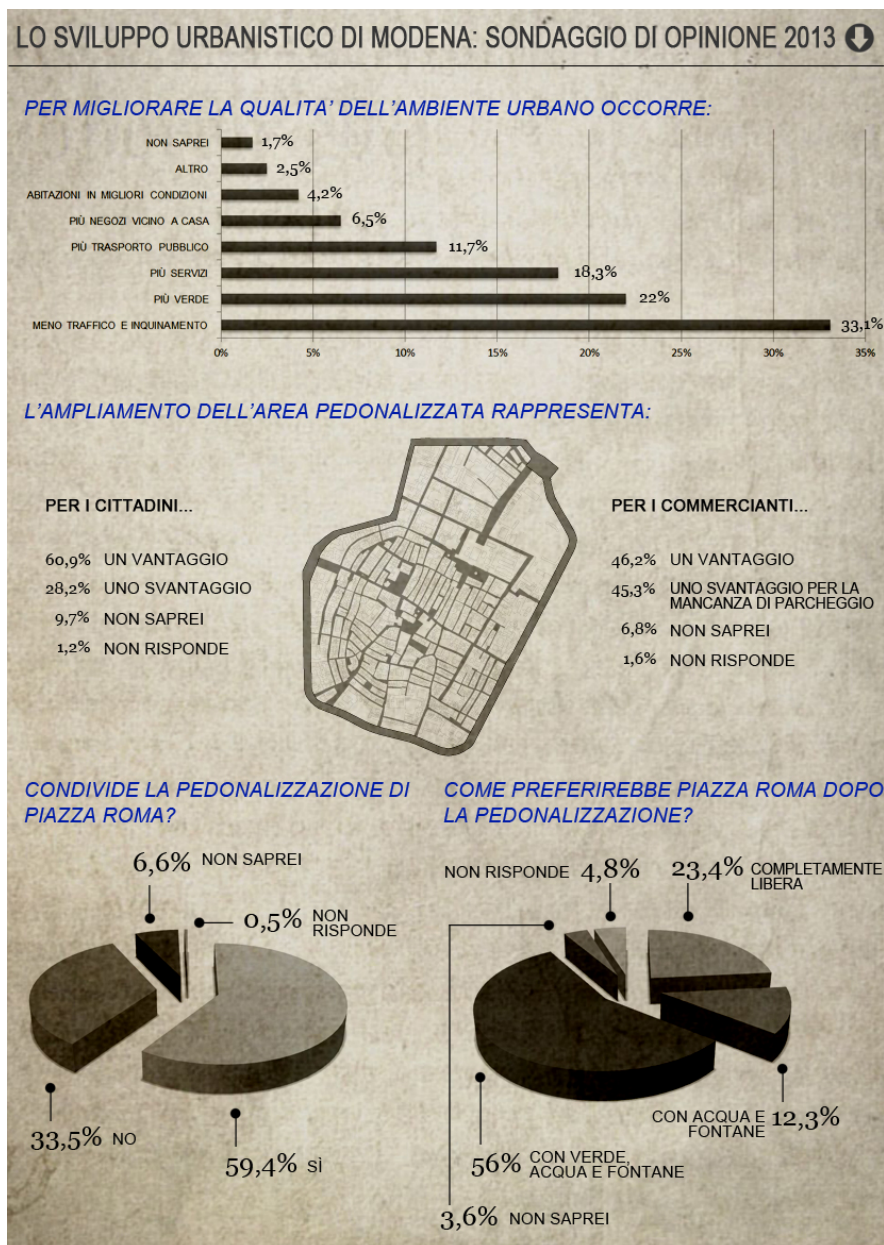


Figura 2.7 – Risultati di alcune domande proposte nel sondaggio sullo sviluppo urbanistico della città condotto nel 2013 dall'Ufficio Ricerche del Comune di Modena

3 LE PAVIMENTAZIONI STRADALI AD ELEMENTI LAPIDEI

3.1 Carichi massimi previsti per le pavimentazioni stradali del centro storico di Modena

I veicoli trasmettono alle pavimentazioni stradali carichi molto diversi sia per entità sia per modalità di applicazione (a seconda della distanza fra gli assi del veicolo e della velocità di marcia): nel caso di automezzi pesanti con assi ravvicinati, infatti, oltre alla presenza di carichi molto più elevati rispetto a quelli generati dai veicoli leggeri, si verifica una sovrapposizione delle deformate sulla sovrastruttura stradale. In figura 3.1 sono riportati i limiti di massa complessiva (tara + pieno carico) dei mezzi pesanti come previsto dall'Art. 62, Titolo III del Codice della Strada:








VEICOLI			CARICO MASSIMO
AUTOBUS	2 assi		19 t
	3 assi		25 t
AUTOSNODATO	3 assi		30 t
AUTOCARRO	2 assi		18 t
AUTOTRENO	3 assi		24 t
	4 assi		40 t
AUTOARTICOLATO	4 o più assi		40 t

Figura 3.1 – Carichi massimi previsti dal Codice della Strada per i mezzi pesanti

Nella zona a traffico limitato del centro storico di Modena il transito dei mezzi pesanti deve avvenire secondo i percorsi definiti dal *Progetto di percorribilità delle strade del centro storico* approvato nel 1995 e aggiornato nel corso degli anni. La circolazione su strade e piazze con pavimentazioni speciali (acciottolati, selciati in porfido o pietra forte alberese e altri lastricati lapidei) è consentita solo ai veicoli con massa complessiva a pieno carico non superiore ai valori indicati in figura 3.2, e comunque non superiore a 22 t.

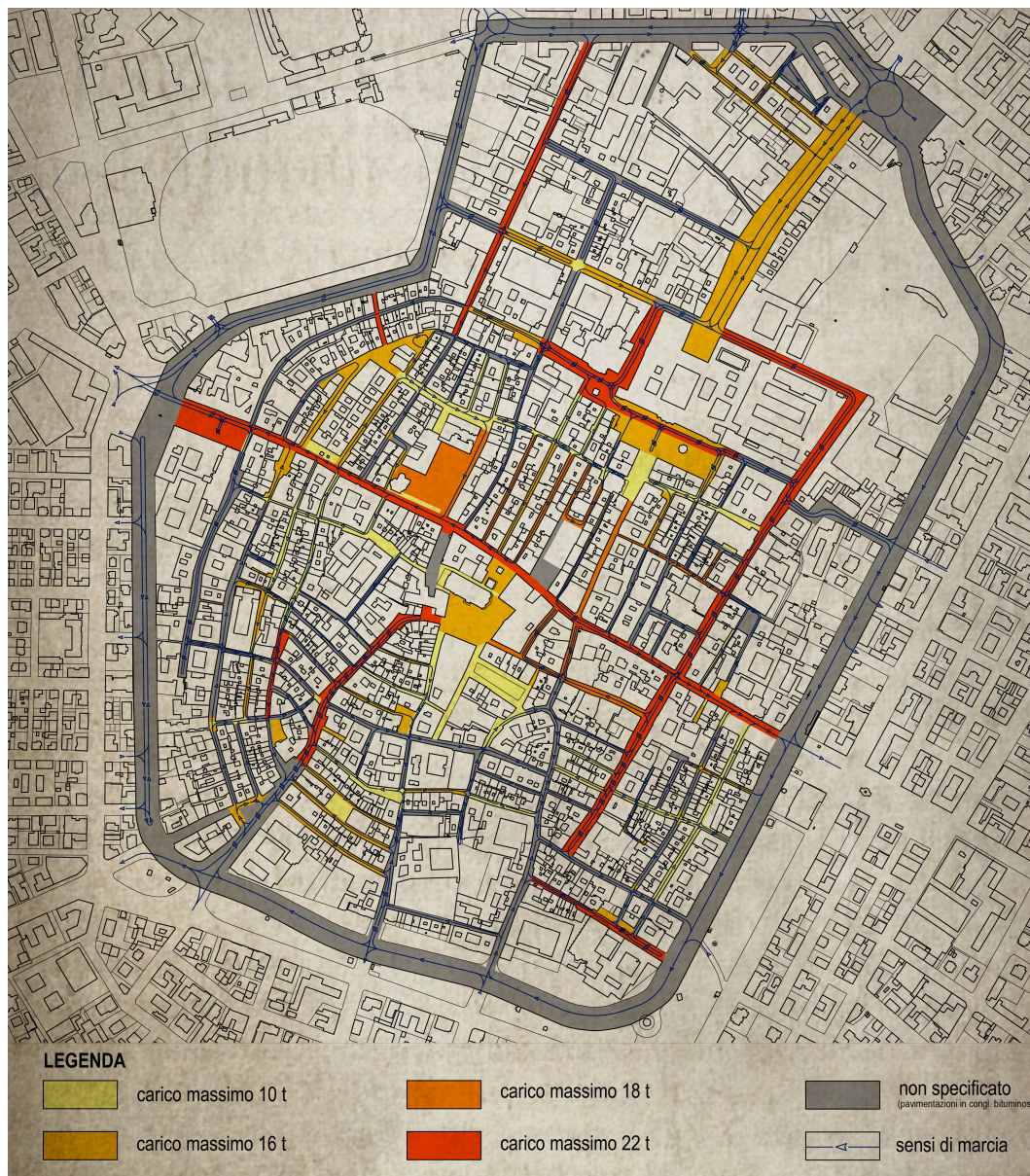


Figura 3.2 – Carichi massimi previsti dal Settore Pianificazione Territoriale, Trasporti e Mobilità per le pavimentazioni in materiale lapideo del centro storico di Modena

3.2 Tipologie storiche di pavimentazione stradale a elementi lapidei

La città di Modena si è sviluppata a partire da un impianto urbanistico di matrice medievale e i tracciati delle sue strade sono stati influenzati dalla presenza dei canali sotterranei: per questo motivo la scelta delle tipologie di pavimentazioni esterne è strettamente legata ai problemi di convogliamento dell'acqua piovana.

Alla fine del '700 le grondaie degli edifici erano costituite da semplici tubi sporgenti chiamati docce che incanalavano l'acqua piovana verso il centro della strada. Un tipo di smaltimento delle acque così rudimentale necessitava di una pavimentazione stradale permeabile.²² Per questo motivo i selciati erano costituiti da ciottoli di fiume ovoidali a testa piana che potevano essere sia posati a secco su un sottofondo di sabbia (*"in sabbione"*), sia fissati con malta idraulica (*"in calcina"*).²² Gli acciottolati erano funzionali allo scolo delle acque piovane perché l'acqua era in grado di percolare tra una pietra e l'altra e si manteneva una superficie di calpestio sopraelevata rispetto al terreno, diminuendo così la formazione di pozzanghere e fango. Il convogliamento delle acque fino alle caditoie era comunque assicurato da particolari disposizioni di ciottoli affiancati a corsello nella guida centrale della strada. Inoltre per facilitare il transito dei carri erano predisposti trottatoi costituiti da lastre di pietra (figura 3.3).²² I marciapiedi, sia quelli esterni sia quelli coperti dai portici, erano pavimentati in pietra o mattoni. Nell'Ottocento la gestione e il controllo delle strade seguiva precise regole approvate dal *Regolamento Stradale* del 15 Settembre 1814 e dalle *Regole per la costruzione dei selciati sotto i portici* del Gennaio 1829: da questo periodo in avanti per la costruzione dei marciapiedi si iniziò a fare uso del battuto alla veneziana e delle lastre di granito rosso o grigio; dal 1880 si diffuse l'utilizzo dei cementi, di durezza e durata paragonabili a quelle della pietra naturale ma dai costi più contenuti. L'uso delle lastre di pietra naturale per i marciapiedi riprese vigore all'inizio del Novecento grazie ad accordi presi con la Società Cooperativa Lombarda di Milano per la fornitura di granito porfirico di Causo al Monte (Lago di Lugano) e granito bianco di San Fedelino (Valtellina), materiali notevolmente resistenti alla compressione e alla levigatura.^{22, 23}

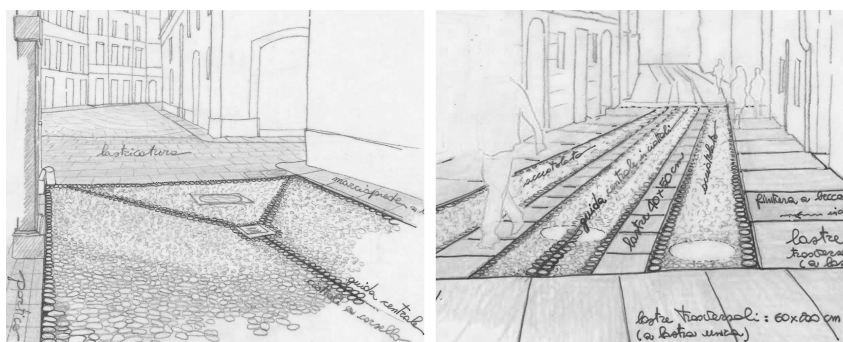


Figura 3.3 – Ricostruzione della disposizione dei ciottoli e dei trottatoi lastricati²²

Le pavimentazioni stradali a elementi lapidei utilizzate nel centro storico di Modena si possono ricondurre a tre principali tipologie tradizionali: la massicciata, i selciati e i lastricati. La differenza fra i vari tipi consiste nella forma e nella dimensione degli elementi.

3.2.1 La massicciata

La massicciata era formata da uno strato di ciottoli, ghiaia o pietrisco costipati con sistemi meccanici fino a costituire una pavimentazione stradale resistente al rotolamento dei veicoli.

La tipologia più utilizzata era la massicciata macadam che prende il nome dall'ingegnere inglese John Loudon MacAdam (1756-1836): sul terreno di sottofondo veniva posato uno strato di fondazione di 20÷25 cm di scapoli di pietra (pietre grezze, spigolose e irregolari) sopra al quale veniva disposta la massicciata, costituita da uno strato di 12÷15 cm di ghiaia e pietrisco di dimensioni comprese fra i 5 e i 7 cm (figure 3.4, 3.5).



Figura 3.4 – Pomonte: Operai al lavoro per la costruzione di una massicciata stradale²⁴

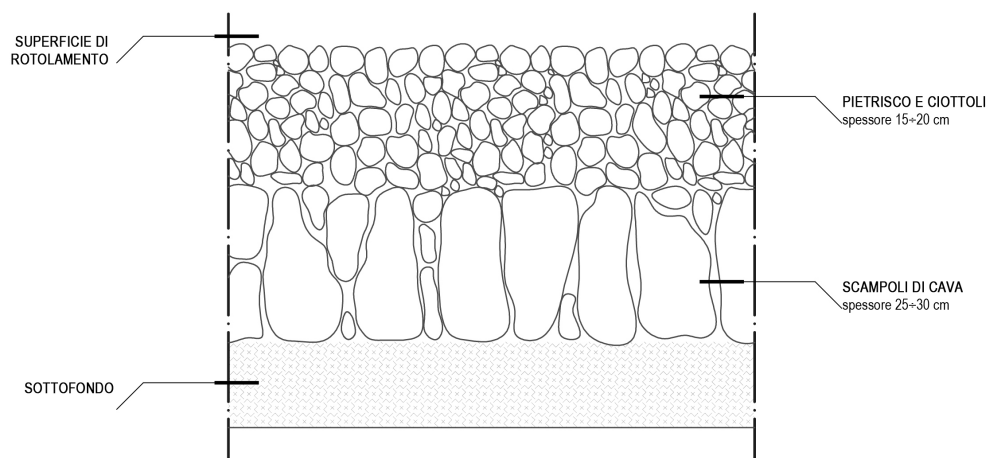


Figura 3.5 – Sezione di una massicciata di tipo macadam

La semplicità esecutiva e la grande reperibilità di materiale permise una rapida diffusione di questo tipo di pavimentazione. Attualmente però è di scarsissimo utilizzo poiché risulta polverosa e cedevole agli odierni volumi di traffico.²⁵

3.2.2 Il selciato

Il selciato è un tipo di pavimentazione stradale formato da elementi di piccole dimensioni di materiale lapideo. Si diffuse nelle città italiane durante il Settecento in sostituzione dei manti stradali in terra battuta, che non garantivano un sufficiente drenaggio delle acque piovane.

SELCIATO IN ACCIOTTOLATO

I ciottoli utilizzati erano di media o grande pezzatura, di forma leggermente allungata e a faccia piana, in modo da formare una superficie di calpestio il più uniforme possibile. La tecnica di posa dell'acciottolato aveva tempi abbastanza lunghi: sopra allo strato di terreno in misto granulometrico si preparava il letto di posa dei ciottoli di 20 cm di spessore, riempiendolo con sabbia a grana grossa di provenienza fluviale (figura 3.6). La posa manuale dei ciottoli avveniva a incastro a secco, senza alcun sistema di fissaggio a calce, per cui successivamente alla posa i ciottoli venivano solamente bagnati e battuti (figura 3.7). La sabbia serviva inoltre per riempire gli interstizi fra gli elementi lapidei ed eventuali irregolarità del piano di posa.²²



Figura 3.6 – Tecnica di posa di un selciato in acciottolato²²

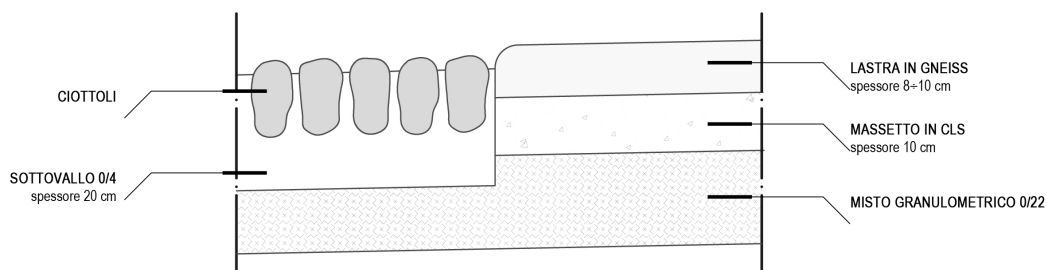


Figura 3.7 – Sezione di un selciato in acciottolato con affiancamento di un percorso pedonale in lastre di gneiss. I ciottoli, dalla forma tronco-conica, sono posati in verticale con la faccia piana in superficie.

SELCIATO IN AMMATTONATO

Grazie alla grande disponibilità di terreno argilloso, Modena era uno dei massimi centri di produzione di cotto della regione. Il cotto per pavimentazioni esterne era impiegato soprattutto nei marciapiedi e nei sottoportici e veniva prodotto come il mattone da costruzione: era lavorato, estruso e tagliato a macchina. Le tipologie più diffuse erano il tradizionale mattone di forma rettangolare (generalmente 12x25x5 cm) e la tavella, un laterizio rettangolare più grande del mattone, forato e di piccolo spessore (3÷4 cm), utilizzato prevalentemente per i selciati interni: entrambi gli ammattonati venivano posati e fissati su un letto di malta (figure 3.8, 3.9).

La colorazione dipendeva dalla quantità di biossidi di ferro contenuti nelle argille e quindi variava secondo il territorio in cui si trovavano le cave: si passava dal color rosa tenue di Forlì, al giallo di Ferrara e al rosso di Modena e Bologna. Attualmente

rimangono testimonianze di pavimentazioni in cotto soprattutto sotto i portici, dove era maggiormente protetto dagli agenti atmosferici: infatti a causa della sua porosità il cotto è un materiale molto sensibile ai cicli gelivi. Più raramente, soprattutto nei sottoportici, si realizzavano pavimentazioni in cotto a elementi quadrati oppure ammattonati a mosaico.



Figura 3.8 – Mattoni posati a costa sotto i portici di via Bonaccorsi e disposti di coltello con orditura a spina di pesce nella pavimentazione prospiciente alla chiesa di San Francesco²²



Figura 3.9 – Ammattonato in tavelle sotto al portico di via Bonacorsa²²

SELCIATO IN PORFIDO

L'impiego del porfido è relativamente recente in quanto risale alla fine del XIX secolo, ma si diffuse rapidamente per la resa regolare del manto stradale e per la durabilità del materiale. Infatti il porfido ha una composizione compatta e vetrosa poiché contiene cristalli di quarzo: risulta così un materiale molto duro, resistente

agli agenti atmosferici e all'abrasione, poco sdruciolevole. Il porfido più diffuso nelle selciature era il porfido trentino, dalle tonalità rosso vivo (per la presenza di pigmenti ferrici), violacee, verdi e grigie (figura 3.10). Gli elementi in porfido erano generalmente tagliati a forma cubica e la posa in opera dei cubetti avveniva tramite fissaggio su letto di sabbia, con giunti regolari non superiori a 1 cm. Il piano di fondazione doveva essere spianato e costipato con maggior cura rispetto agli altri tipi di pavimentazione per via della limitata dimensione di base dei singoli pezzi. I giunti venivano quasi sempre sigillati con malta magra ben pressata negli interstizi, ma le tracce del legante venivano via via asportate durante le operazioni di pulitura del manto.²²



Figura 3.10 – Selciato in porfido lungo via Farini

Nel tipo di posa “ad archi contrastanti”, il più comune per i selciati in porfido, i cubetti sono disposti secondo serie continue di archi di cerchio con stesso raggio in modo che due archi continui abbiano in comune l'elemento di imposta (figura 3.11).

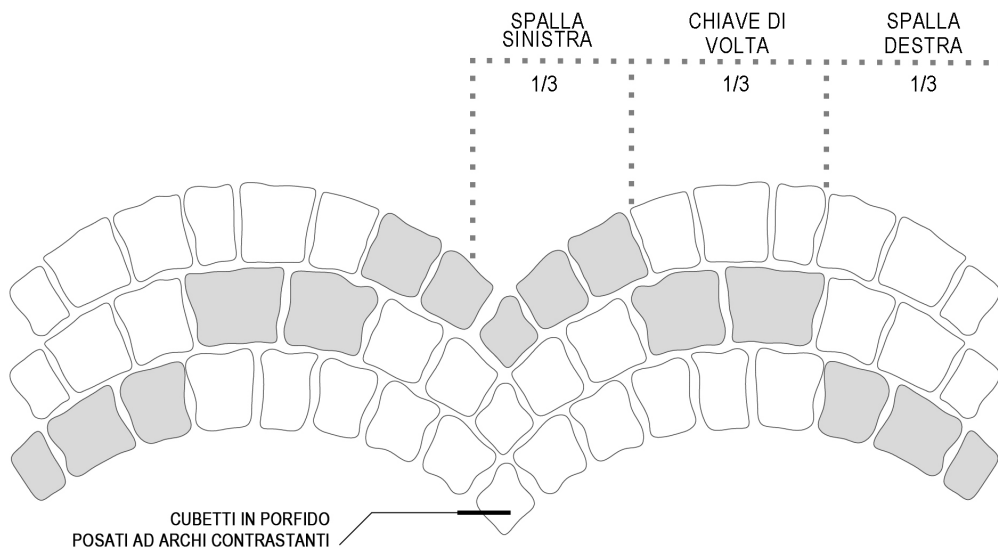


Figura 3.11 – Schema della disposizione ad archi contrastanti in cubetti di porfido

3.2.3 Il lastricato

I lastricati sono tipi di pavimentazioni stradali a elementi lapidei di medie o grandi dimensioni costruiti in modo simile ai selciati, anche se la posa è resa più difficile a causa del peso maggiore delle pietre. La modalità di posa tradizionale dei lastricati era quella per filari ortogonali o obliqui rispetto all'asse della strada di modo che i cerchioni di ferro delle ruote evitassero di seguire i giunti, che rappresentavano le zone più deboli del manto stradale.²²

Le lastre impiegate per la realizzazione dei lastricati erano per lo più a forma di parallelepipedo, rettangolo o quadrato e le misure variavano secondo l'impiego. Le dimensioni delle lastre raggiungevano anche 50 cm di lato e talvolta nei marciapiedi si utilizzavano anche sagome con lato superiore al metro, con spessori compresi fra 15 e 20 cm. La superficie in vista, chiamata superficie di marcia, derivava dal piano principale di spacco e veniva in seguito levigata (figure 3.12, 3.13).²²

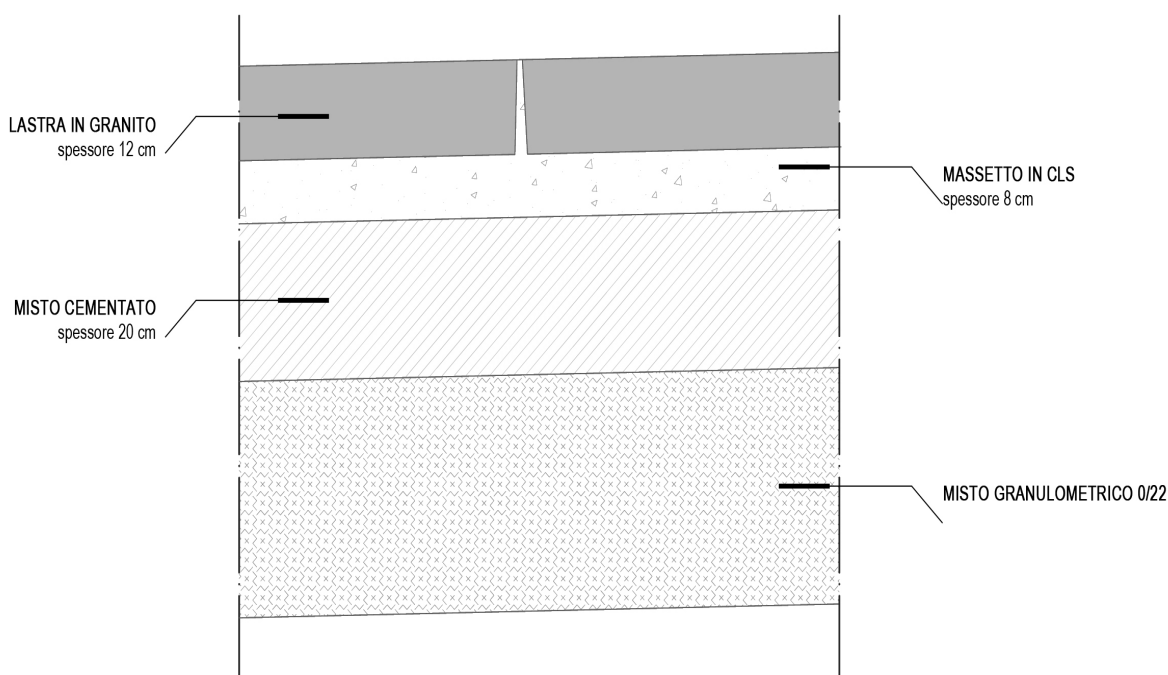


Figura 3.12 – Sezione di un lastricato con elementi in granito



Figura 3.13 – Lastre in granito rimosse durante i lavori di riqualificazione di Piazza Roma nel 2014

I materiali lapidei più adatti alle pavimentazioni in lastre sono quelli che conservano una tessitura leggermente granulosa nonostante l'usura dovuta all'azione del traffico in modo da mantenere le caratteristiche di aderenza necessarie al passaggio dei veicoli. Le rocce magmatiche più utilizzate nei lastricati dei centri storici della pianura padana erano il granito di varietà alpina e il porfido trentino (figura 3.14). In alcune città dell'Emilia i lastricati potevano anche essere in roccia sedimentaria come l'arenaria, facilmente lavorabile ma che tende a sfogliarsi per l'usura dovuta all'attrito e per la scarsa resistenza agli agenti atmosferici, o come i calcari veronesi, di colore rosso, rosato o bianco, utilizzati per i marciapiedi (figura 3.15). Fra le rocce metamorfiche erano spesso impiegati lo gneiss e la quarzite (figura 3.16).²²



Figura 3.14 – Lastricato in granito in via Farini



Figura 3.15 – Lastricato in arenaria con sfaldatura da gelo²²



Figura 3.16 – Lastricato in gneiss lungo Canalgrande

3.3 Caratteristiche dei materiali lapidei utilizzati nel centro storico di Modena

Le pavimentazioni stradali in materiale lapideo costituiscono il 26% della superficie totale del centro storico di Modena (figura 3.17). Per ogni tipo di materiale lapideo attualmente in uso è stata redatta una scheda tecnica che ne riassume la collocazione, la tipologia, le caratteristiche fisiche e meccaniche.

Le schede tecniche sono inserite all'interno del fascicolo contenente gli elaborati grafici.



Figura 3.17 – Le pavimentazioni stradali del centro storico di Modena

PARTE 2 Piazza Roma

4 LE TRASFORMAZIONI STORICHE DI PIAZZA ROMA

Nella seconda metà del XIII secolo l'asprezza delle lotte intestine fra le famiglie nobiliari modenesi per la conquista del potere spinse il Vescovo Boschetti a offrire la guida della città ad un'autorità esterna: fu così che nel 1289 venne scelto Obizzo d'Este, signore di Ferrara, e iniziò il dominio degli Estensi sulla città di Modena. Venne acquisito un edificio in Piazza Grande come residenza per i rappresentanti del Marchese, mentre la sede delle truppe militari venne assegnata ad un castello di nuova costruzione: il luogo prescelto per la sua realizzazione fu una zona abitata che venne convertita a quartiere militare.²⁶ Nelle cronache parmensi si riporta che nel 1293

«Dominus Obizo marchio estensis fecit in civitate Mutine, in bucca Navillii unum castrum cum uno palatio et quatuor turribus, muratum circumquaque et affossatum cum ponti bus levatoriis.»

«Il signore Obizzo, marchese estense, costruì nella città di Modena, sul canale Naviglio, un edificio a pianta quadrilaterale, guarnito da quattro torri e attorniato da mura, circondato da una fossa difensiva sulla quale aggettano ponti levatoi».²⁶

Nel 1306 una coalizione costituita da Parma, Bologna, Brescia, Mantova e Verona appoggiò una sollevazione popolare contro Azzo d'Este: il castello fu assediato e il marchese fu costretto a fuggire verso Ferrara attraverso il Naviglio. Venne instaurata la *Respublica Mutinensis* e il castello simbolo del potere estense venne completamente demolito.²⁶

Gli Estensi ottennero nuovamente il dominio su Modena a partire dal 1336 e iniziarono subito i lavori di costruzione di un secondo castello, situato nello stesso luogo della fortezza militare precedente. Lo storico Vicini, avvalendosi di piante risalenti alla fine del XVI secolo, descrive il secondo castello estense

«come il primo, rettangolare, quadriturrito, merlato e munito di ponti levatoi, aveva l'apparenza più di una fortezza che di un palazzo. Aveva un solo cortile con loggia o portico lungo i lati di mezzogiorno, mentre nel primo piano, sopra il cortile, lungo i lati di levante e di ponente, correivano poggioli di legno. Nel lato settentrionale per un ponte levatoio si usciva dalla città»²⁷

Nel 1343 gli Este ordinarono la demolizione delle case poste fra il Naviglio e gli orti dei frati di San Domenico allo scopo di creare una piazza di fronte al castello (figura 4.1).²⁷

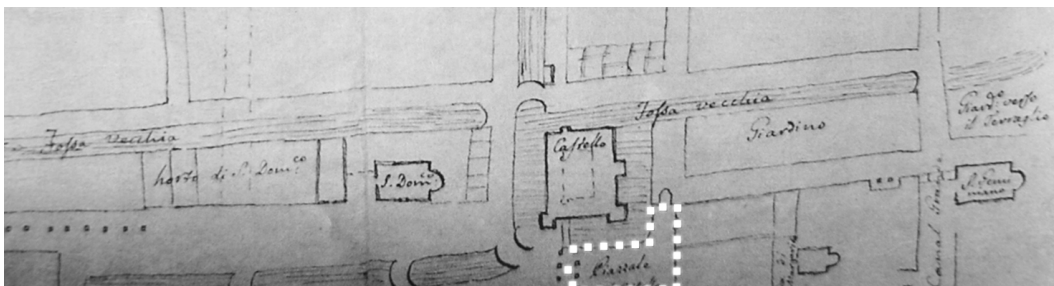


Figura 4.1 – Disegno successivo al 1560 conservato nel Fondo Venturi della biblioteca Panizzi di Reggio Emilia. La mappa mostra la “fossa vecchia” della cinta muraria e la chiesa di San Domenico, orientata con l’abside verso est e fiancheggiata a sud dal canale della Cerca. La chiesa fu ricostruita con l’orientamento attuale (abside a nord) nel 1710.²⁸

Nel 1598 Ferrara passò sotto il dominio dello Stato della Chiesa e il duca Cesare d’Este si dovette trasferire a Modena con tutta la sua corte: la città divenne la nuova capitale del Ducato Estense e nacque così l’esigenza di trasformare il castello in una degna sede di rappresentanza. Come sottolinea l’ampliamento settentrionale delle mura, l’intera città attraversò un periodo di grande cambiamento: il fulcro del potere cittadino si spostò da Piazza Grande all’estremità nord orientale del centro, dove venne realizzato il Palazzo Ducale inglobando l’antico castello (figure 4.2, 4.3). Infatti il castello perse definitivamente ogni funzione difensiva e divenne oggetto di un’incessante opera di progettazione e ristrutturazione che lo trasformò in palazzo. Lo sviluppo dimensionale della nuova residenza estense rese necessaria la demolizione della vicina chiesa di San Domenico, che venne successivamente ricostruita con un orientamento diverso, così come appare oggi.



Figura 4.2 – Disegno di Bartolomeo Fenis del 1658 che rappresenta lo stato di avanzamento dei lavori: sullo sfondo si eleva per intero il primo piano del palazzo, mentre in ultimo piano è riconoscibile il volume del vecchio castello.²⁹

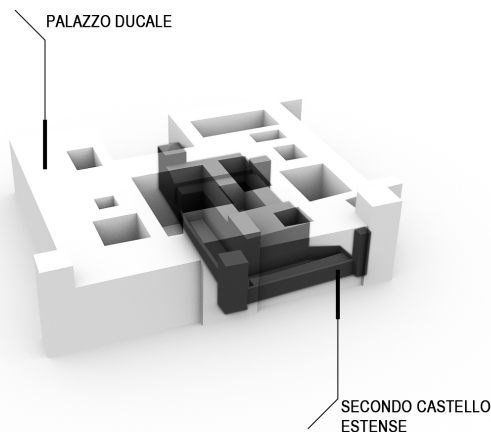


Figura 4.3 – Ricostruzione delle volumetrie del secondo castello estense sovrapposte a quelle del palazzo ducale

Il passaggio da castello a palazzo ducale si accompagnò alla trasformazione di Piazza Roma che da spazio vuoto di pertinenza del castello diventò uno spazio urbano progettato.

Intorno al 1783 venne demolito l'edificio antistante a Casa Levi per ingrandire lo spazio pubblico, che venne denominato Piazzale del Palazzo Ducale (figura 4.4). Ercole III, duca dal 1780 al 1797, pianificò di circondare la piazza con edifici porticati simmetrici ma il progetto non venne realizzato e fu ripreso e attuato solo parzialmente durante l'Ottocento (figura 4.5).



Figura 4.4 – Demolizione dell'edificio antistante a Casa Levi (1783). Porzione della pianta "Decus estensium Mutina reaedificata regnante Francisco III, anno 1770" disegnata da Rogier de Beaufort (Modena, Museo Civico d'Arte, Raccolta stampe).

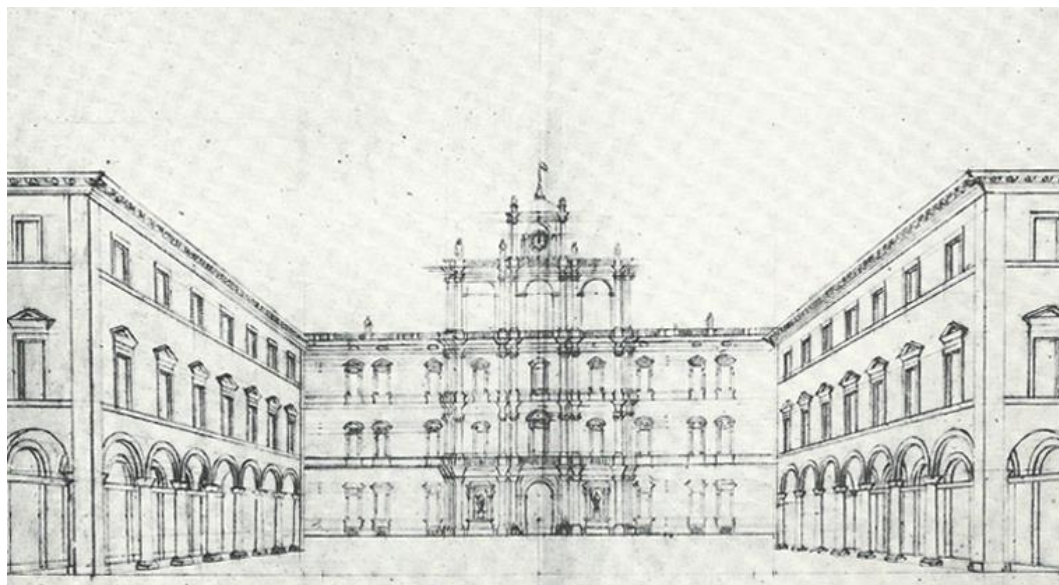


Figura 4.5 – Progetto di sistemazione del Piazzale del Palazzo Ducale (solo parzialmente eseguito), Mappe Campori 152, Archivio Storico di Modena.

Napoleone entrò a Modena nel 1796, l'anno successivo incluse la città all'interno della Repubblica Cispadana e nel 1805 si fece proclamare Imperatore dei Francesi e Re d'Italia.

Dopo la Restaurazione e il ritorno alla situazione politica antecedente al periodo napoleonico, a Modena venne ricostituito il Ducato sotto il dominio di Francesco IV d'Asburgo-Este, arciduca d'Austria. Nel 1831 il duca fece imprigionare e impiccare il rivoluzionario *Ciro Menotti* per aver organizzato un'insurrezione con l'obiettivo di liberare il ducato dal governo austriaco: un monumento dedicato a Menotti fu realizzato nel 1879 e posto in Piazza Reale, con lo sguardo che sembra rivolto alla stanza del palazzo in cui venne firmata la sua condanna a morte.¹

Tra il 1814 e il 1859 venne portata avanti un'incessante opera di manutenzione e progettazione del Palazzo Ducale con la creazione del lato orientale, dell'ala destra del lato settentrionale, del loggiato e delle scuderie³⁰: il restauro conferì quindi al palazzo la sua immagine attuale. Vennero inoltre promossi i lavori per l'apertura del Corso Reale (l'attuale Corso Accademia Militare) in modo da collegare direttamente la piazza a Canalgrande e dare rilievo al palazzo.³¹ La stampa in figura 4.6 e il dipinto in figura 4.7, ambientati rispettivamente agli inizi e nella seconda metà del '700, rappresentano come doveva apparire la piazza prima dell'apertura del Corso Reale.

¹ In realtà la condanna a morte nei confronti di *Ciro Menotti* fu emanata da Francesco IV mentre si trovava nella sua residenza padovana.³⁰



Figura 4.6 – Veduta della piazza e del Palazzo Ducale di Modena, stampa del 1700³²



Figura 4.7 – Piazzale del Palazzo Ducale così come appariva nella seconda metà del Settecento³²

Con l'allontanamento di Francesco V e l'annessione al Regno d'Italia, Modena passò da capitale di un Ducato a semplice città di provincia e quindi l'attività edilizia di quel periodo proseguì in tono più dimesso, non dovendo più rispondere a esigenze di rappresentanza: la Piazza Ducale fu rinominata Reale (e successivamente Piazza Roma nel 1911).³³ Il Palazzo Estense divenne proprietà del Demanio Militare per una donazione fatta dal Re Vittorio Emanuele II nel 1863, dopo che egli ne era entrato in possesso per diritto di successione dinastica a causa dell'abbandono degli Austro-Estensi, legittimi eredi. Il Palazzo venne adibito ad uso di pubblici uffici e di abitazione per alcune autorità, mentre continuavano ad essere presenti pinacoteca, archivio, biblioteca. Vennero condotte massicce opere di adattamento fra cui la demolizione del cavalcavia che metteva in comunicazione gli appartamenti ducali con la chiesa di S. Domenico e lo stesso teatro di corte, nonché la costruzione di un nuovo refettorio là dove era ubicata la legnaia ducale.³³ A fine Ottocento e nei primi anni del Novecento vennero avanzate varie proposte di intervento e restauro della facciata, ma tutte furono successivamente abbandonate.

Nel settembre 1942 i tedeschi di stanza a Modena occuparono il Palazzo Estense facendo prigionieri gli ufficiali e i militari che vi si trovavano e installando i propri reparti fino all'aprile del 1945. Il palazzo venne colpito da un bombardamento aereo durante la Seconda Guerra Mondiale e ai danni bellici si aggiunsero le spoliazioni conseguenti all'occupazione tedesca (figura 4.8).



Figura 4.8 – Danni subiti a seguito di un bombardamento aereo durante la Seconda Guerra Mondiale³³

Fra gli interventi realizzati in Piazza Roma nella prima metà del Novecento si hanno notizie archivistiche del progetto di costruzione di un rifugio antiaereo completato nel marzo del 1943 sul lato sinistro della piazza e demolito nel 1945 (figura 4.9). L'edificio fu ulteriormente lesionato e reso parzialmente inagibile a seguito del terremoto che colpì le Marche nel 1972.



Figura 4.9 – Rifugio antiaereo costruito in Piazza Roma nel marzo 1943⁷

Nel corso degli anni '80 venne condotto un intervento di consolidamento per salvaguardare la struttura del palazzo dai fenomeni di subsidenza dovuti alla conformazione geologica argillosa del terreno³⁰: gli ingegneri Pozzati e Alessi rilevarono che la forma, l'ampiezza e la distribuzione delle lesioni era da ricondurre prevalentemente a movimenti disuniformi del sottofondo riguardanti una vasta zona della città (figura 4.10). Il Palazzo Ducale risultava particolarmente coinvolto per via della sua notevole estensione planimetrica e per la sua ubicazione a cavallo di due zone della città che presentavano abbassamenti del sottosuolo molto differenti. Nel caso specifico, l'abbassamento è risultato disuniforme per numerose cause come gli elevati e prolungati prelievi di acqua nelle zone periferiche per usi industriali ed agricoli, la diversità intrinseca delle caratteristiche dei suoli e del grado di consolidamento dei terreni, la varietà dei carichi agenti in superficie.



Figura 4.10 – Posizione dei fabbricati che presentavano lesioni dovute ai cedimenti del terreno³⁴

I rilievi hanno segnalato anche cedimenti maggiori nella parte di sinistra del Palazzo (rispetto all'ingresso principale), probabilmente a causa della presenza sulla parte di destra delle preesistenti fondamenta del vecchio castello che hanno determinato un maggiore consolidamento del terreno sottostante.²⁶ Il progetto di consolidamento fu condotto dai Prof. Croci e Cerone, titolari del corso di Principi di Progettazione Strutturale presso la Facoltà di Ingegneria di Roma, con la collaborazione dei Professori Alessi e Pozzati del Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria di Bologna. I lavori di consolidamento e di riassetto del Palazzo durarono per circa un ventennio.

«La soluzione scelta per porre rimedio a una situazione statica così delicata è stata quella di creare punti giunti, separazioni nette delle strutture, seguendo sostanzialmente le lesioni già createsi, in altre parole regolarizzando e completando con taglio delle murature l'apertura delle lesioni in modo da annullare le tensioni ancora esistenti in tali zone e ridurre le coazioni presenti nelle altre»³⁵ (figura 4.11)

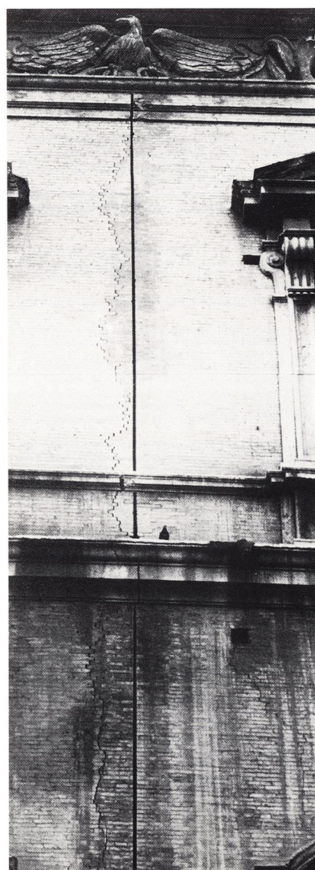


Figura 4.11 – Giunto in corrispondenza della facciata su Piazza Roma che crea una separazione netta fra le strutture attraverso un taglio delle murature lungo le lesioni già createsi

Durante l'ultimo decennio l'Amministrazione Comunale si è proposta di pedonalizzare la piazza. Le indagini effettuate nella piazza tra 2006 e 2007 per verificare la fattibilità della costruzione di un parcheggio interrato hanno confermato la presenza di una porzione delle fortificazioni della città romana (figura 4.12). Durante gli scavi archeologici è stata condotta un'analisi stratigrafica del terreno: per un'altezza di circa 6 m è stata documentata un'alternanza di depositi alluvionali e giacimenti archeologici databili dall'età romana all'età contemporanea (figura 4.13).



Figura 4.12 – Scavo condotto in Piazza Roma nel maggio del 2006³⁶

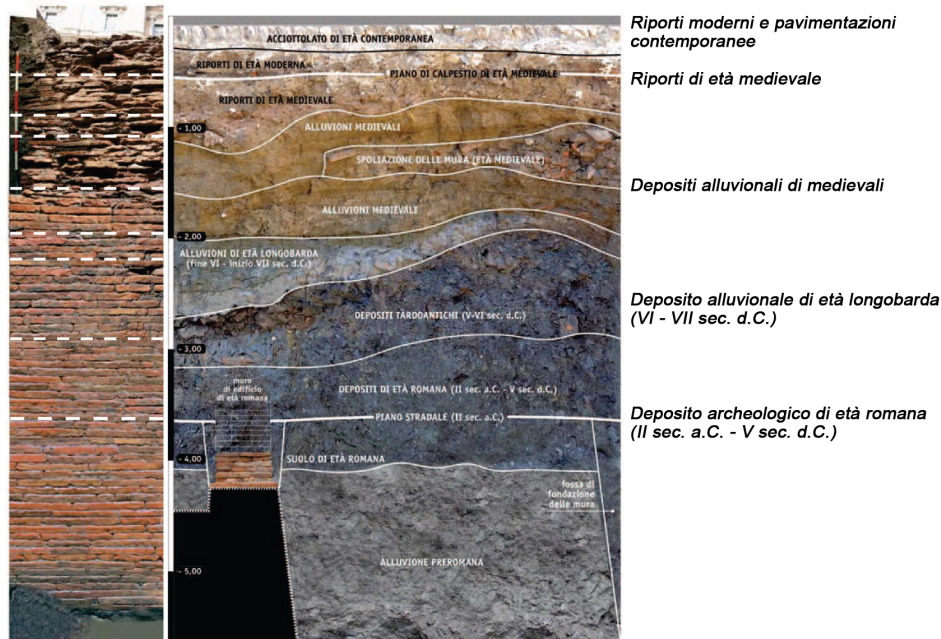


Figura 4.13 – Stratigrafia del terreno in Piazza Roma³⁶

Alla fase di spoliatura segue un riempimento e un livellamento del terreno con macerie molto frantumate composte prevalentemente da piccoli frammenti di laterizi. Al tetto dell'unità stratigrafica 6 è presente un piano di calpestio tagliato da una trincea di fondazione pertinente ad un muro in ciottoli largo 1 m. Si tratta di un muro di testa da mettere forse in relazione ai resti del castello medievale di Modena (probabilmente faceva parte delle strutture di accesso al castello).³⁶

In epoca medievale si hanno un secondo deposito alluvionale a matrice limosa (di colore bruno chiaro), un terzo apporto a matrice limo-sabbiosa e infine un quarto deposito sempre a matrice limosa. Quest'ultimo apporto alluvionale è tagliato da uno strato contenente resti di materiale di risulta da demolizioni, quindi si tratta di una trincea di spoliatura delle fortificazioni romane probabilmente avvenuta in età basso-medievale.³⁶

I depositi di età romana sono coperti da due depositi alluvionali di colore grigio: il primo è a matrice argillosa molto plastica ed il secondo è a matrice sabbiosa con alternanza di strati di sabbia e argilla. Dopo l'alluvione di età longobarda (databile intorno all'ultimo quarto del VI sec. d.C. sulla base di fonti documentarie) le antiche fortificazioni romane risultavano ancora visibili ed è verosimile che anche in età alto-medievale venissero utilizzate come opera difensiva.³⁶

E' spesso in media circa 1,5 m e vi sono stati ritrovati pezzi di anfore, intonaci, tessere di mosaico, vetri e resti vegetali in buono stato di conservazione. Lo strato che si è accumulato a sud del muretto risulta leggermente più argilloso.³⁶

In seguito al ritrovamento dei reperti archeologici di epoca romana a pochi metri dalla quota carrabile della piazza, il progetto di costruzione del parcheggio interrato è stata accantonata. Fino al 2014 la piazza, pavimentata con conglomerato bituminoso, è stata aperta al traffico e adibita a zona di sosta per le automobili.

5 GLI ELEMENTI CARATTERISTICI DELLA PIAZZA

LA FONTE D'ABISSO

Ai piedi del torrione orientale del Palazzo Ducale si trovava l'antica Fonte d'Abisso¹, utilizzata per il rifornimento idrico dei locali delle cucine (figura 5.1).

Nel corso del Settecento la fonte fu circondata da un muretto a pianta quadrata in modo da proteggere la gradinata di accesso alla vasca. Nel 1865 venne spostata dall'altro lato della strada secondo il progetto dell'architetto Cesare Costa, che prevedeva anche l'inserimento di due rampe di scale curvilinee per accedere alla fonte.³⁰



Figura 5.1 – Fotografia del 1910 dove si osserva la posizione originale della Fonte d'Abisso e il sistema di illuminazione della piazza. Archivio Tonini, Biblioteca Civica d'Arte Poletti

¹Il termine "Fonte d'Abisso" deriva dal latino medioevale *bissa* e significa "alveo di fiume o canale". La Fonte d'Abisso era così chiamata perché si trovava in corrispondenza del Canale d'Abisso, noto per le sue acque particolarmente pulite.³⁰

L'allacciamento della fonte alla rete idrica dell'acquedotto comunale venne realizzato a partire dal 1946: la vasca fu interrata e sostituita da una fontana di ghisa alla quota del piano stradale (figura 5.2).



Figura 5.2 – Fotografia del 1946 scattata durante i lavori di allacciamento della fontana all'acquedotto comunale. Archivio Tonini, Biblioteca Civica d'Arte Poletti

Agli inizi degli anni 2000 venne approvato dall'amministrazione comunale il progetto di sistemazione della pavimentazione a ovest della piazza: in occasione dei lavori la Fonte d'Abisso fu ritrovata perfettamente conservata in quasi tutte le sue parti. Il progetto di ripristino è stato diretto dalla Sovrintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici delle Province di Bologna, Modena e Reggio Emilia nel 2004 (figura 5.3).



Figura 5.3 – La Fonte d'Abisso dopo il restauro del 2004³⁰

IL MONUMENTO A CIRO MENOTTI

Il 6 giugno 1880 venne inaugurato in Piazza Roma un monumento dedicato al patriota **Ciro Menotti**, che aveva cercato di liberare la città di Modena dal dominio del governo austriaco. L'opera fu realizzata da **Cesare Sighinolfi** e rappresenta **Ciro Menotti** con un'espressione severa e col pugno destro stretto in segno di sdegno contro il duca **Francesco IV**, che firmò la sua condanna a morte. La statua fu posta nella porzione occidentale della piazza, in modo che potesse volgere lo sguardo in direzione del Palazzo Ducale (figure 5.4, 5.5, 5.6).²⁸



Figura 5.4 – Cartolina storica di Modena antecedente al 1880: manca il monumento a **Ciro Menotti**. Archivio Tonini, Biblioteca Civica d'Arte Poletti



Figura 5.5 – Fotografia del 1910. Archivio Tonini, Biblioteca Civica d'Arte Poletti



Figura 5.6 – Foto attuale del monumento a Ciriaco De Mita

IL MERCATO DEI FILUGELLI

A partire dal XVII secolo di fronte al Palazzo Ducale venne allestito sotto ai portici il “Mercato dei filugelli²” (figura 5.7). La città di Modena era, infatti, sede di numerosi filatoi e necessitava di un luogo per il commercio dei bachi da seta. Proprio come a Bologna, quindi, il portico della piazza ducale fu chiamato *Pavaglione*³. Grazie al progressivo sviluppo del mercato, nell'Ottocento venne aperto al commercio dei bachi da seta anche il portico del palazzo delle Belle Arti e dal 1885 l'intero mercato fu trasferito al Foro Boario.²⁸

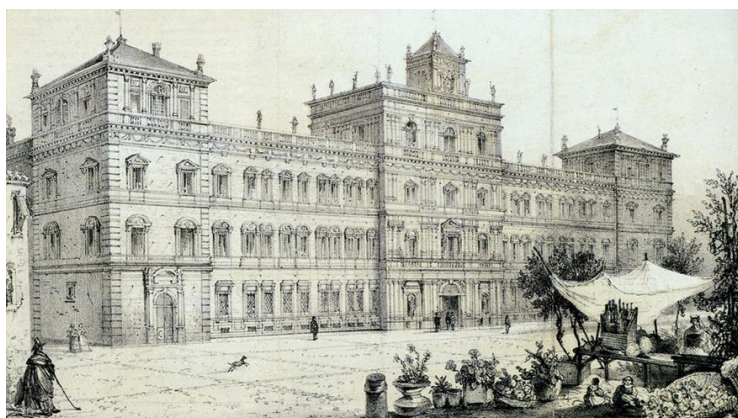


Figura 5.7 – Palazzo di Modena, prima metà del secolo XIX. Modena, collezione privata²⁶

²Il termine filugello indica il baco da seta e deriva dal latino filum sericum (“filo di seta”) a cui si riconnettono le forme medioevali follexellus e follicello (“bozzolo”).

³Termine dialettale che individua il “padiglione”, tipica tenda con cui veniva oscurato l’arco del portico al fine di proteggere i banchi del mercato dei bachi da seta.

IL TEATRO ALIPRANDI

Nel 1862, per iniziativa dell'impresario Achille Aliprandi, venne inaugurato un teatro sul lato nord di Corso Accademia (figure 5.8, 5.9). Il Teatro Aliprandi era di piccole dimensioni, con tre file di palchi sorrette da colonne. Rimase aperto per soli 19 anni poiché fu distrutto da un incendio nel 1881, mezz'ora dopo l'esecuzione del dramma Nerone di Pietro Cossa (1830-1881).³⁷ I locali del teatro tornarono in seguito al servizio dell'Accademia militare e vennero utilizzati per la costruzione degli alloggi degli Ufficiali.³¹

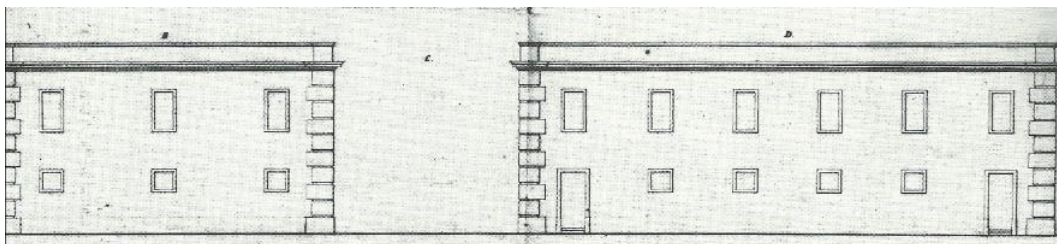


Figura 5.8 – Esterno del teatro Aliprandi in corso Accademia militare, Archivio Storico Comunale di Modena, Atti Amministrativi, a. 1862, F624, Ornato, fascicolo 5³¹

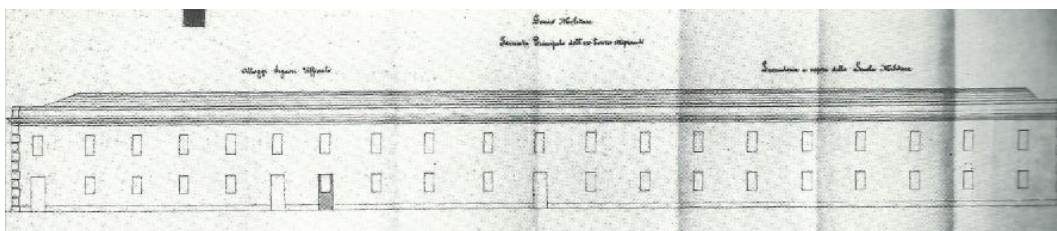


Figura 5.9 – Facciata dell'edificio che occupa tutto il lato settentrionale del corso Accademia (comprendente anche l'area del distrutto teatro Aliprandi) costruito per essere adibito ad alloggi per gli ufficiali ed altri servizi dell'Accademia militare³¹

6 LA PEDONALIZZAZIONE DI PIAZZA ROMA

Dagli anni '70 a oggi Piazza Roma è stata completamente carrabile e dotata di circa 200 spazi di sosta a pagamento nei giorni feriali, gratuita di sera e nel fine settimana. Il sottofondo originario in acciottolato era ricoperto da un manto di conglomerato bituminoso. La circolazione pedonale era prevista principalmente ai margini della piazza, lungo marciapiedi e portici, con l'eccezione di due percorsi pavimentati con lastre di granito che collegavano via Farini all'ingresso dell'Accademia militare e alla chiesa di San Domenico (figura 6.1).



Figura 6.1 – Cartolina del 1971 che mostra la piazza in gran parte occupata dalle automobili in soste (Archivio Panini – Fondazione Fotografia Modena)³⁰

Uno dei principali obiettivi dell'amministrazione comunale, dal 2007 a oggi, è stato quello di limitare il traffico nel centro storico, favorendo l'accesso pedonale e la riqualificazione degli spazi pubblici. L'obiettivo del progetto *"Le 5 piazze"*, elaborato dagli assessorati alla Programmazione e Gestione del territorio e al Centro Storico, era valorizzare le piazze più importanti della città assegnando ad ognuna una funzione specifica e affidandone la resa formale ad un architetto di fama mondiale. Nel 2008, infatti, l'amministrazione comunale incaricò l'architetto Mario Botta di realizzare alcuni progetti di trasformazione estetica e funzionale di Piazza Matteotti, Piazza Roma, Piazza Mazzini, Piazza XX Settembre e Piazza Sant'Agostino.

Per Piazza Roma venne proposta la totale pedonalizzazione dello spazio pubblico e la costruzione di un'area di sosta sotterranea (capienza di oltre 200 posti auto) in corrispondenza del cortile dell'Accademia militare. Un parcheggio di dimensioni inferiori era previsto in superficie per la sosta dei residenti in Piazza Roma (figura 6.2).³⁰

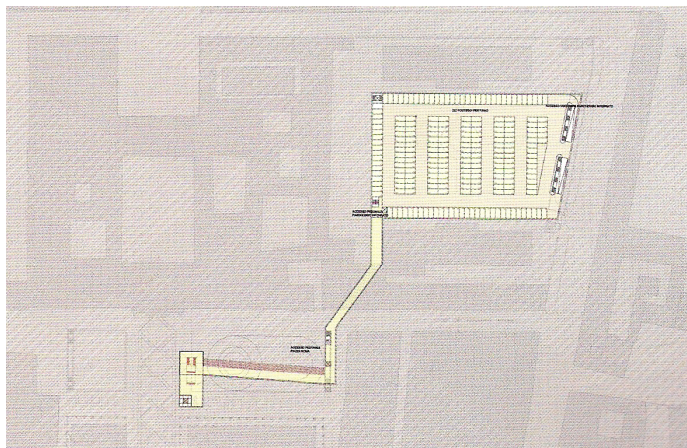


Figura 6.2 – Ipotesi progettuale di Mario Botta: il parcheggio interrato in corrispondenza del giardino interno del Palazzo Ducale è collegato alla piazza tramite un percorso pedonale sotterraneo³⁰

La piazza, pavimentata con lastre calcaree di colore rosso, era stata progettata con una vasca d'acqua di circa 30 m nella porzione occidentale e con un grande prato verde nella parte orientale. Le due zone erano suddivise da una trama geometrica in lastre di calcare bianco in corrispondenza dell'ingresso del Palazzo Ducale (figure 6.3, 6.4, 6.5).

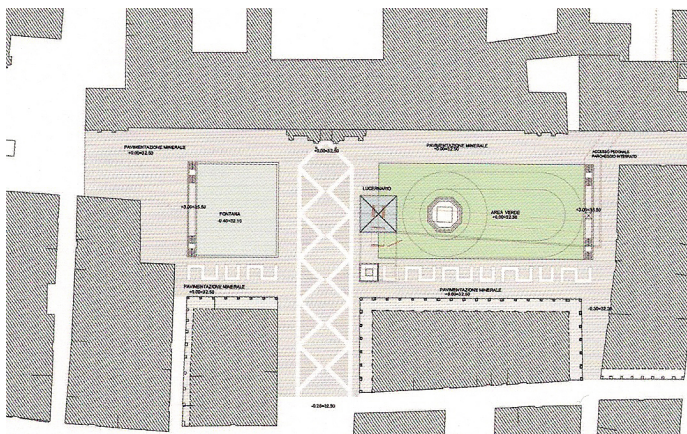


Figura 6.3 – Ipotesi progettuale di Mario Botta: pianta³⁰



Figura 6.4 – Ipotesi progettuale di Mario Botta: vista della porzione occidentale³⁰



Figura 6.5 – Ipotesi progettuale di Mario Botta: vista della porzione orientale³⁰

La proposta di Mario Botta raccolse numerose critiche da parte sia della Soprintendenza, sia di privati cittadini. Date le difficoltà riscontrate già nelle prime fasi di presentazione del progetto, l'amministrazione comunale preferì optare per un intervento di sistemazione della pavimentazione meno impattante sull'immagine della piazza. L'incarico di formulare una nuova proposta per Piazza Roma, quindi, passò nelle mani dell'Arch. Giovanni Cerfogli, progettista del Servizio di Pianificazione Urbanistica del Comune di Modena. Tuttavia l'eliminazione del parcheggio in Piazza Roma rimase al centro di numerose polemiche. Il dibattito non verteva tanto sulla pedonalizzazione della piazza (condivisa dalla maggior parte dei cittadini, come mostra il sondaggio riportato nel paragrafo 2.3.2.), quanto sui tempi, sui costi e sulle modalità di realizzazione del progetto. I residenti e i commercianti della zona, infatti, chiedevano di rinviare i lavori per timore che la pedonalizzazione potesse creare disagi alle attività economiche in un momento delicato come quello della crisi finanziaria diffusasi a partire dal 2008.

Il primo progetto presentato alla fine del 2012 dall'Arch. Cerfogli seguiva alcune linee guida dell'idea di Mario Botta: prevedeva, infatti, giochi d'acqua e l'inserimento di giardini pensili nella porzione orientale della piazza (figure 6.6, 6.7, 6.8). Anche in questo caso la Soprintendenza esprimeva parere contrario in particolar modo riguardo all'area verde poiché

«piazze come questa, davanti alle regge, venivano usate per manovre militari e per rappresentazioni, ma non avevano la funzione di giardino»¹

Venne quindi studiata, insieme alla Soprintendenza, una nuova soluzione senza spazi verdi, che potesse offrire occasioni di svago e di socialità nel rispetto della memoria storica e del contesto morfologico.

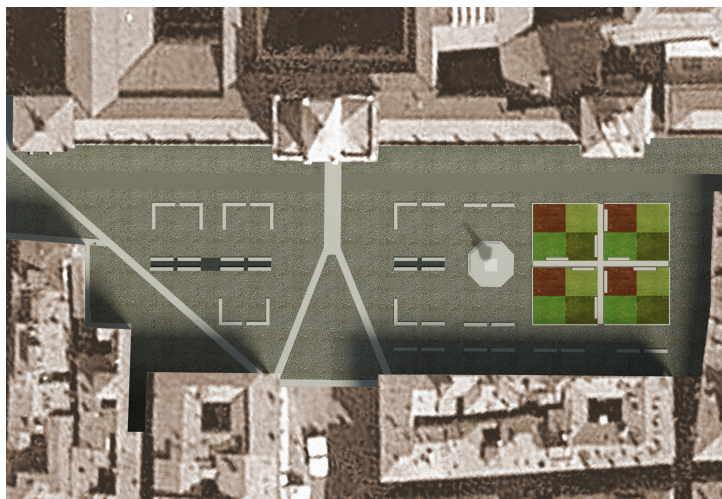


Figura 6.6 – Prima proposta progettuale dell'Arch. Cerfogli: pianta

¹ Arch. Di Francesco C., direttrice regionale dei Beni Culturali, alla conferenza di presentazione dell'intervento di restauro della facciata dell'Accademia Militare. Modena, 5 febbraio 2013.³⁸



Figura 6.7 – Prima proposta progettuale dell'Arch. Cerfogli: vista della porzione occidentale



Figura 6.8 – Prima proposta progettuale dell'Arch. Cerfogli: vista della porzione orientale

6.1 Il progetto di riqualificazione di Piazza Roma

Il secondo progetto proposto dall'Arch. Giovanni Cerfogli, approvato nel 2013, si configura quindi come un intervento architettonico leggero, finalizzato alla pedonalizzazione dello spazio pubblico, nel rispetto della memoria storica e del contesto morfologico.³⁹ I nuovi arredi e le fontane progettate per attrezzare la piazza sono facilmente rimovibili in caso di necessità e permettono, quindi, un utilizzo dinamico dello spazio pubblico anche in occasione di eventuali manifestazioni, come le iniziative dell'Accademia militare o il Festival delle Bande Militari (figura 6.9).

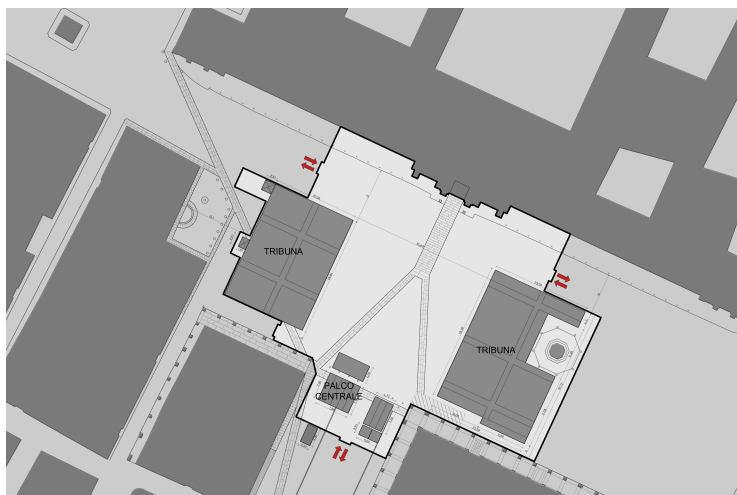


Figura 6.9 – Spazio d'uso richiesto per l'installazione delle tribune per il Festival delle Bande Militari

Il progetto di riqualificazione prevede la realizzazione di quattro fontane di due diverse tipologie: due fontane a raso, ciascuna con 9 erogatori di getti d'acqua modulabili, e due fontane a laminazione, costituite da un velo d'acqua sul piano di una vasca a sfioro. Le fontane a laminazione sono l'elemento progettuale che richiama la presenza dei canali sotterranei: la vasca centrale, che attraversa trasversalmente la piazza, si trova in corrispondenza del sottostante corso del canale Naviglio, mentre la vasca longitudinale parallela allo sviluppo della facciata dell'Accademia indica la direzione di Canal Grande prima della sua confluenza nel Naviglio. Le superfici occupate dalle fontane sono pavimentate in pietra forte alberese, semplicemente delimitate da feritoie senza dislivelli significativi: in questo modo, arrestando il flusso di acqua, diventano spazi praticabili.³⁹

Le opere previste per la realizzazione del progetto comprendono:³⁹

1. rimozione generale delle pavimentazioni esistenti con pulitura, vagliatura e stoccaggio del materiale lapideo costituito da ciottoli di fiume e lastre di granito (da reimpiegare nella nuova pavimentazione);

2. scavo del sottofondo [profondità 60-80 cm];
3. scavo in sezione obbligata [profondità 80-120 cm] per le linee delle reti gas-acqua-elettriche;
4. scavo in sezione obbligata [profondità 80-150 cm] per le reti fognarie;
5. scavo per il vano tecnico dell'impianto di gestione delle vasche d'acqua [profondità 3 m, superficie 50 m²]:
 - a) costruzione del locale per alloggiare pompe, vasca di accumulo, depuratore e impianto elettrico;
 - b) posa delle reti e impianti per l'alimentazione delle superfici d'acqua;
6. formazione della fondazione stradale;
7. formazione del sottofondo:
 - a) in misto cementato per le superfici pavimentate in lastre di granito e selce;
 - b) in stabilizzato permeabile per le superfici in acciottolato;
 - c) in calcestruzzo armato impermeabilizzato in corrispondenza delle vasche d'acqua;
8. costruzione del vano tecnico interrato con setti e solaio in cca;
9. posa delle pavimentazioni in materiale lapideo (lastre di granito di recupero, conci di pietra forte alberese e acciottolato di recupero);
10. costruzione delle vasche a sfioro per gli specchi d'acqua (alloggiamento dei diffusori per i getti d'acqua e delle canaline perimetrali di scolo a feritoia);
11. sistemazione delle sedute in materiale lapideo;
12. revisione del sistema di illuminazione.

La realizzazione del progetto è prevista in due stralci funzionali: il primo, per un importo complessivo di 500.000 €, include la realizzazione della porzione occidentale della pavimentazione (in ciottoli e pietra alberese), la costruzione del vano tecnico e di una fontana a raso; il secondo stralcio, per un importo pari a 1.600.000 €, comprende la realizzazione di una fontana a raso e due fontane a laminazione, il completamento delle pavimentazioni stradali e il posizionamento degli arredi.⁴⁰

Nelle figure 6.10÷6.17 vengono confrontate alcune viste dello stato di fatto di Piazza Roma, prima dell'inizio dei lavori, e del progetto di riqualificazione attualmente in esecuzione.

Grazie alla disponibilità del Settore Manutenzione, Traffico e Logistica del Comune di Modena ed in particolare dell'Ing. Nabil El Ahmadiè, ho potuto frequentare in prima persona il cantiere in Piazza Roma ed effettuare una raccolta di fotografie delle varie fasi di lavoro che si riporta in appendice.



Figura 6.10 – Stato di fatto: prospetto del Palazzo Ducale



Figura 6.11 – Progetto di riqualificazione: prospetto del Palazzo Ducale



Figura 6.12 – Stato di fatto: vista della porzione occidentale



Figura 6.13 – Progetto di riqualificazione: vista della porzione occidentale



Figura 6.14 – Stato di fatto: corso Accademia



Figura 6.15 – Progetto di riqualificazione: corso Accademia



Figura 6.16 – Stato di fatto: vista della porzione orientale



Figura 6.17 – Progetto di riqualificazione: vista della porzione orientale

PARTE 3 Le vibrazioni indotte dal traffico stradale

7 IL PROBLEMA DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO

Il traffico stradale, in particolar modo quello dovuto ai mezzi pesanti, produce vibrazioni che possono danneggiare gli edifici prospicienti alla strada, provocare rumore e arrecare disturbo alle persone. Il problema delle vibrazioni in ambito stradale si riscontra soprattutto nei centri storici a causa dell'antichità e del valore del patrimonio edilizio, della maggiore rugosità della superficie stradale costituita spesso da elementi lapidei irregolari, e del progressivo aumento del volume di traffico. I materiali e le strutture, infatti, subiscono nel tempo una graduale perdita delle caratteristiche di resistenza e di integrità per effetto delle ripetute sollecitazioni e deformazioni prodotte dal passaggio dei veicoli.⁴¹

Nel presente capitolo viene descritto lo stato dell'arte sulle problematiche legate alle vibrazioni da traffico: si tratterà quindi della fisica del fenomeno vibratorio e del quadro normativo italiano e internazionale.

7.1 Il fenomeno vibratorio

Le vibrazioni sono un fenomeno meccanico di tipo dinamico, caratterizzato da oscillazioni attorno ad una posizione di equilibrio che si ripetono nel tempo con una certa **frequenza**¹.

Dal punto di vista della durata del fenomeno, le vibrazioni possono essere classificate in 3 tipologie:⁴¹

- VIBRAZIONI DI LIVELLO COSTANTE
quando il livello dell'accelerazione complessiva rilevato mediante costante di tempo (1 secondo) varia in un intervallo di ampiezza inferiore a 5 dB, si può considerare la vibrazione come ininterrotta per tutto l'intervallo di tempo considerato;
- VIBRAZIONI INTERMITTENTI
quando tale livello varia in un intervallo di ampiezza superiore a 5 dB, si riscontra una variazione della vibrazione di breve durata, intervallata da vibrazioni di livello molto inferiore;

¹Le definizioni delle parole scritte in grassetto sono riportate in ordine alfabetico nella sezione *Definizioni*

→ VIBRAZIONI IMPULSIVE

quando sono generate da eventi di breve durata che producono un rapido innalzamento del livello di accelerazione fino a raggiungere un picco massimo che si smorza e tende ad estinguersi nel tempo.

Le vibrazioni indotte dal traffico stradale appartengono alla tipologia delle vibrazioni intermittenti e sono generate da molti fattori concomitanti, tra cui alcune specifiche del veicolo e la sua velocità di marcia, l'irregolarità della pavimentazione, le caratteristiche del pacchetto stradale, le proprietà e la stratificazione del terreno, lo stato di conservazione degli edifici.⁴²

La sorgente del fenomeno vibratorio è il veicolo in movimento: quando le ruote percorrono le irregolarità della superficie stradale, il veicolo e il suo sistema di sospensioni sono soggetti a un moto oscillatorio verticale e interagiscono in modo dinamico con la pavimentazione e il profilo stradale.⁴¹ Parte dell'energia degli automezzi in moto viene, quindi, trasmessa alla strada e ai terreni circostanti sotto forma di onda. Lo studio delle onde prodotte dal traffico veicolare avviene scomponendo il fenomeno in 3 fasi principali: generazione, propagazione e ricezione delle vibrazioni (figura 7.1).

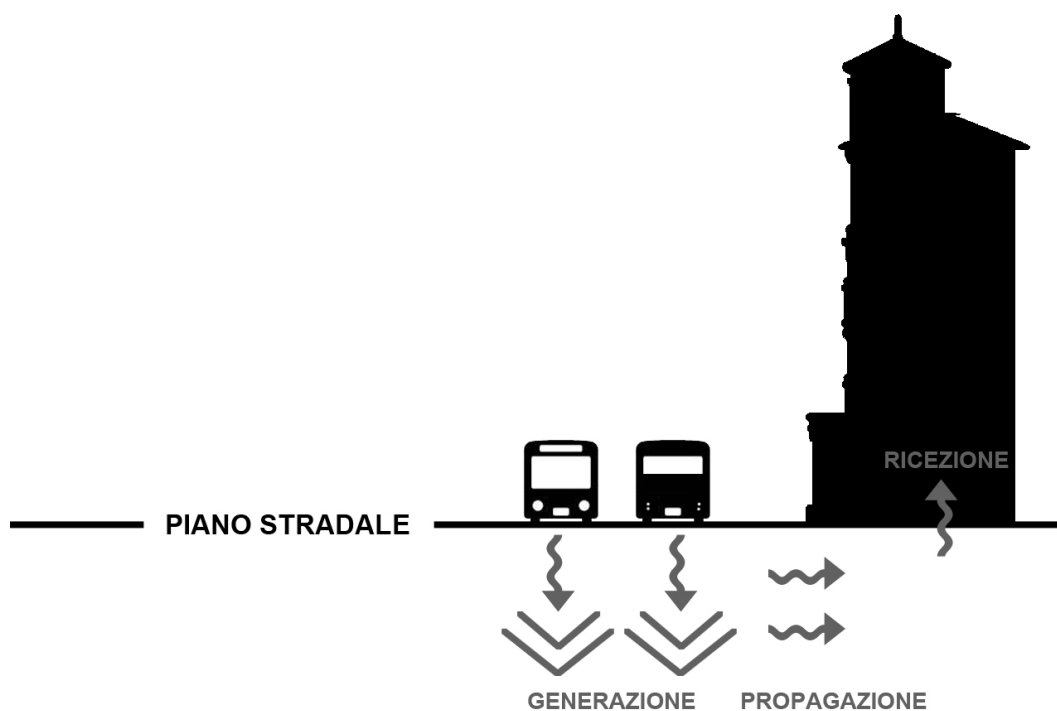


Figura 7.1 – Generazione, propagazione e ricezione delle vibrazioni indotte da traffico stradale

7.1.1 Generazione dei carichi dinamici e delle vibrazioni

La zona interessata dal fenomeno di generazione delle vibrazioni da traffico è costituita dal veicolo, dalla pavimentazione, dagli strati di fondazione del pacchetto stradale e da una porzione del terreno di sottofondo.⁴³

7.1.1.1 Il veicolo

Fra i fattori che contribuiscono alla nascita e allo sviluppo del fenomeno vibratorio assumono particolare importanza le dimensioni, il peso, il sistema di sospensioni e il tipo di pneumatici del veicolo. Alcuni studi sperimentali hanno confrontato le vibrazioni prodotte da diverse tipologie di veicoli e hanno confermato che quelli pesanti provocano la maggior parte delle vibrazioni rilevabili, mentre quelli leggeri, come ad esempio le automobili, generano vibrazioni difficilmente percepibili all'interno degli edifici.^{44,45} Per questo motivo le sorgenti di vibrazioni alle quali si fa riferimento in questa tesi sono esclusivamente i mezzi pesanti.

I carichi verticali applicati alla superficie stradale da un asse di un veicolo in moto hanno una componente statica (data dal peso, dalla geometria e dalla distribuzione delle masse) e una componente dinamica (dipendente dal sistema delle sospensioni e dalla velocità del veicolo).⁴⁶ Per valutare i carichi dinamici si possono utilizzare sia modelli matematici di simulazione, sia metodi sperimentali, con sensori installati sul veicolo (*vehicle-based systems*) oppure con rilevatori integrati alla strada (*road-based systems*). I modelli matematici vengono applicati prevalentemente in ambito progettuale, mentre per studiare i danni su una pavimentazione esistente sono impiegati soprattutto i sistemi *road-based* poiché sono necessarie numerose misure.

I modelli matematici per la simulazione dei carichi dinamici sono simili a quelli utilizzati nel campo dell'Ingegneria Meccanica per l'analisi del comportamento dei veicoli. I veicoli vengono schematizzati come sistemi di masse, concentrate o discrete, che rientrano in due categorie:

- MASSE SOSPESE (telaio, carrozzeria, motore), ovvero l'insieme di elementi che durante il moto subiscono una variazione della loro distanza dal terreno;
- MASSE NON SOSPESE (ruote, sospensioni, parte dell'impianto frenante e della trasmissione).

La descrizione del comportamento dinamico di questi sistemi di masse avviene attraverso i modelli analitici indicati in figura 7.2. Per i veicoli pesanti si utilizzano in genere modelli a più gradi di libertà.⁴¹

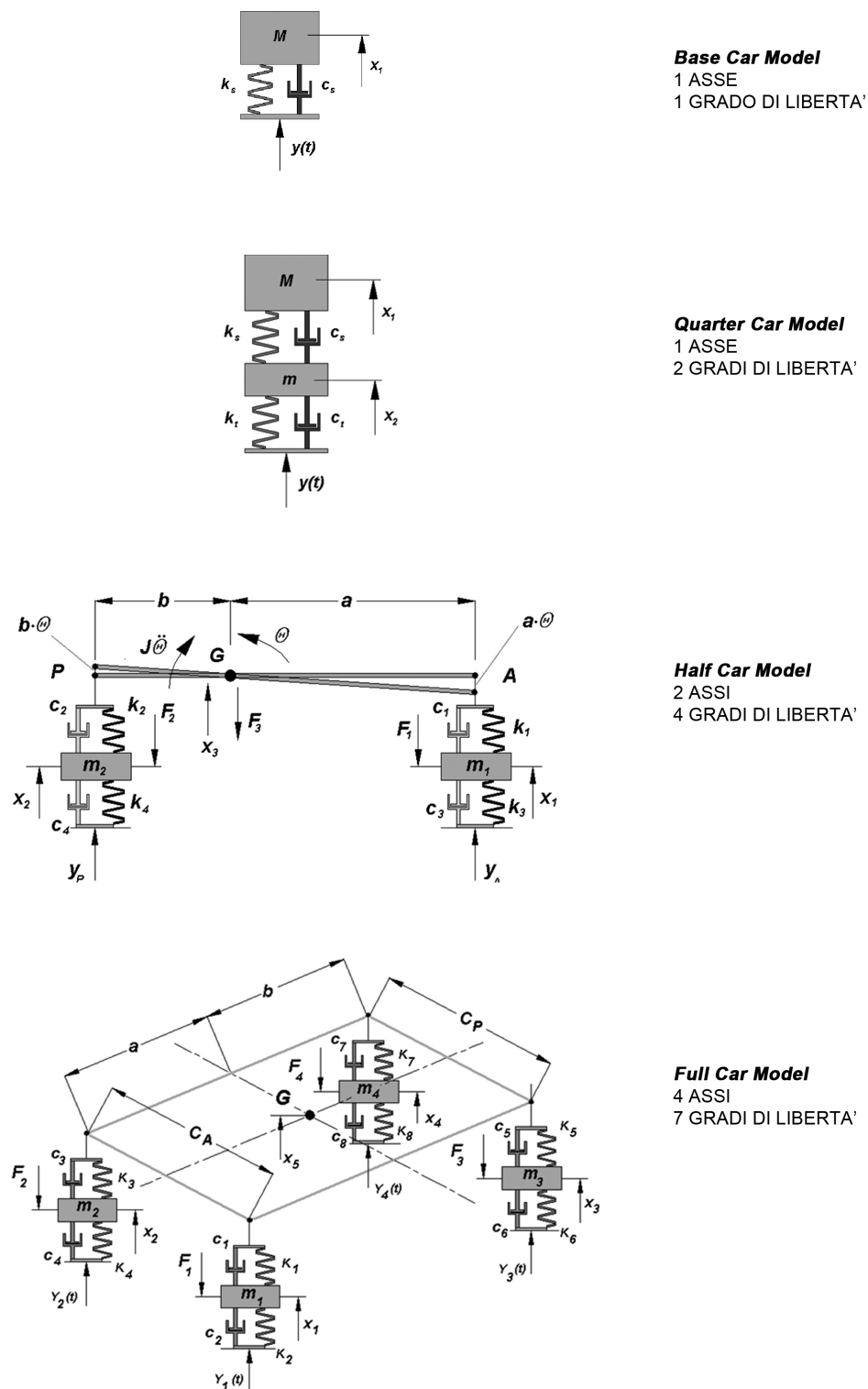


Figura 7.2 – Modelli di rappresentazione del comportamento dinamico dei veicoli

E' stato riscontrato in letteratura che la frequenza di oscillazione del corpo del veicolo (masse sospese) varia da 1,5 a 3,9 Hz, mentre la frequenza alle ruote (masse non sospese) varia da 7,5 a 19,6 Hz.^{47,48,49,50} Il sistema di sospensioni, schematizzato come un insieme di molle accoppiate a smorzatori viscosi⁴¹, permette, dunque, una notevole diminuzione delle vibrazioni che giungono alle masse sospese. Nel campo dell'Ingegneria Stradale l'obiettivo è valutare le sollecitazioni indotte dal veicolo sulla strada piuttosto che la risposta meccanica dettagliata del veicolo: risulta, quindi, sufficiente utilizzare un modello semplice a un asse e 2 gradi di libertà (*Quarter Car Model*).

Le sollecitazioni dinamiche, quindi, aumentano al crescere della velocità di marcia, delle irregolarità della strada e del tipo di sospensioni: a titolo di esempio si riporta in figura 7.3 un confronto numerico fra valori sperimentali del **coefficiente di carico dinamico** per diverse tipologie di sospensioni e velocità di marcia di un veicolo pesante, in condizioni di superficie stradale liscia, ordinaria e irregolare.⁴⁶ Come si può notare dai grafici, le sospensioni ad aria permettono al veicolo di trasmettere alla strada carichi dinamici minori, limitando anche l'incidenza della velocità e delle condizioni della pavimentazione sull'entità delle sollecitazioni.

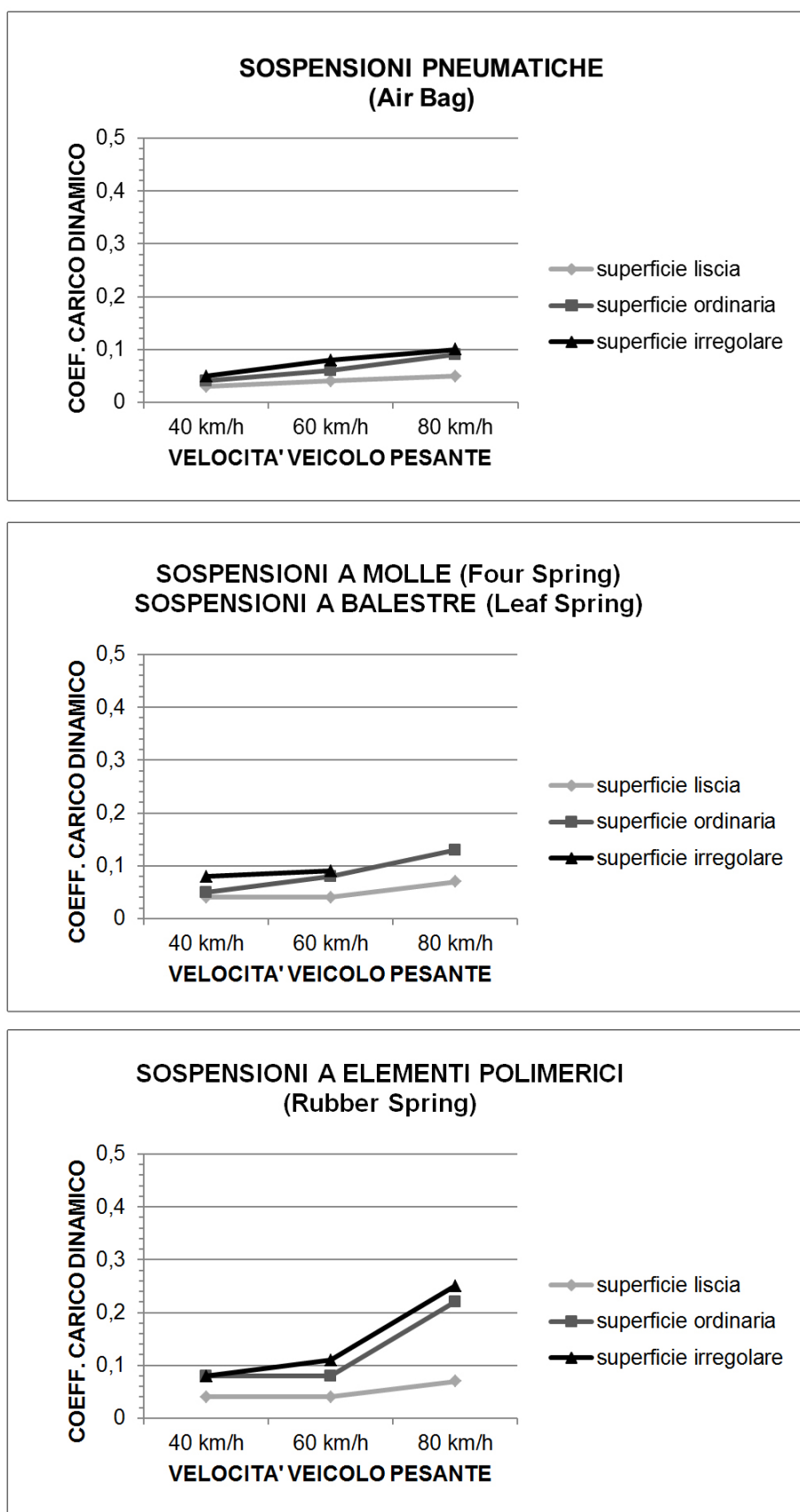


Figura 7.3 – Valori sperimentali del coefficiente di carico dinamico

Anche la velocità del mezzo pesante influisce sull'interazione dinamica veicolo-profilo stradale e sulle conseguenti vibrazioni indotte.⁴¹

A veicolo fermo, sullo pneumatico agisce solo il carico statico dovuto al peso (P). Quando il veicolo è in moto nel punto di contatto fra ruota e pavimentazione stradale sono applicate anche la componente della reazione esplicita sulle ruote dalla strada (forza di aderenza, A) e la forza di trazione (T) (figura 7.4).

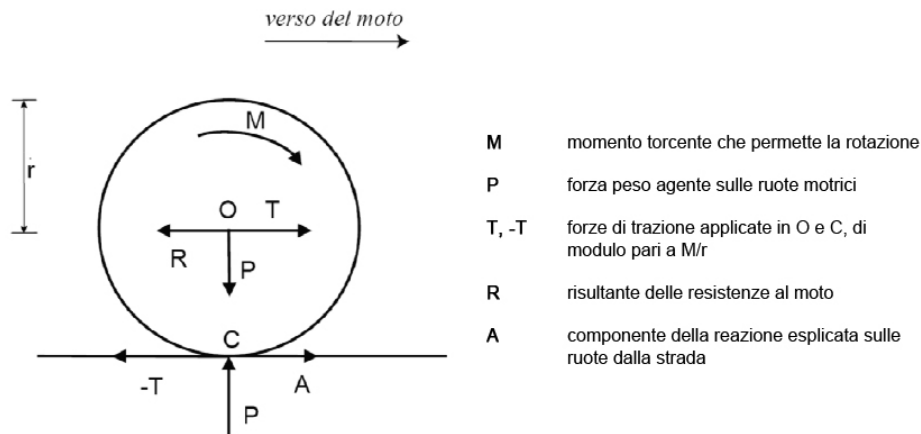


Figura 7.4 – Schema delle forze agenti su una ruota motrice di un veicolo

Affinché si abbia il moto di rotolamento attorno al punto di contatto fra ruota e superficie stradale, il vincolo in O deve cedere (condizione di moto $T > R$) e il vincolo in C deve resistere (condizione di aderenza $T < A$). Nel caso di presenza di una perturbazione al moto fornita dall'irregolarità della superficie stradale, la forza necessaria per spingere lo pneumatico oltre l'ostacolo è la componente orizzontale della forza: più la velocità di marcia è elevata, minore è la resistenza che il gradino esercita sulla ruota (figura 7.5). Tuttavia più è alta la velocità del veicolo, tanto più è breve il lasso di tempo in cui avviene la compressione verticale del gradino sullo pneumatico, e nel superamento dell'ostacolo vengono indotte vibrazioni più intense.⁴⁶

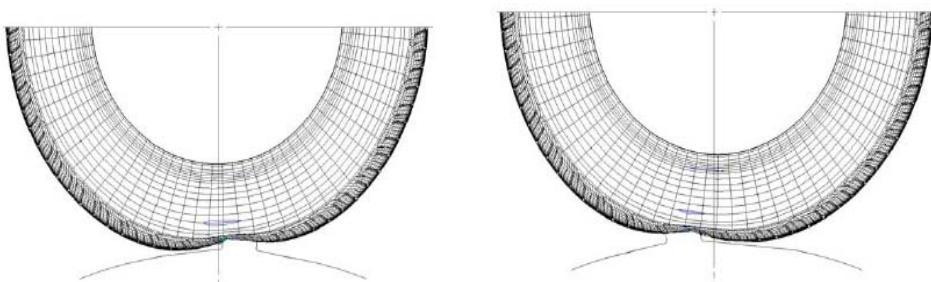


Figura 7.5 – Impatto dello pneumatico su una irregolarità della superficie stradale⁴⁶

7.1.1.2 La regolarità della superficie stradale

La quota di carico dinamico del veicolo che si trasmette al terreno dipende anche dalla presenza delle irregolarità sulla superficie stradale causate da ammaloramenti (**fessurazioni**, **ondulazioni**, **cedimenti**, **dissesti**, **buche**) e discontinuità (giunti tra elementi, accostamento di materiali diversi, presenza di tombini, caditoie e dissuasori di velocità) (figura 7.6).⁵¹

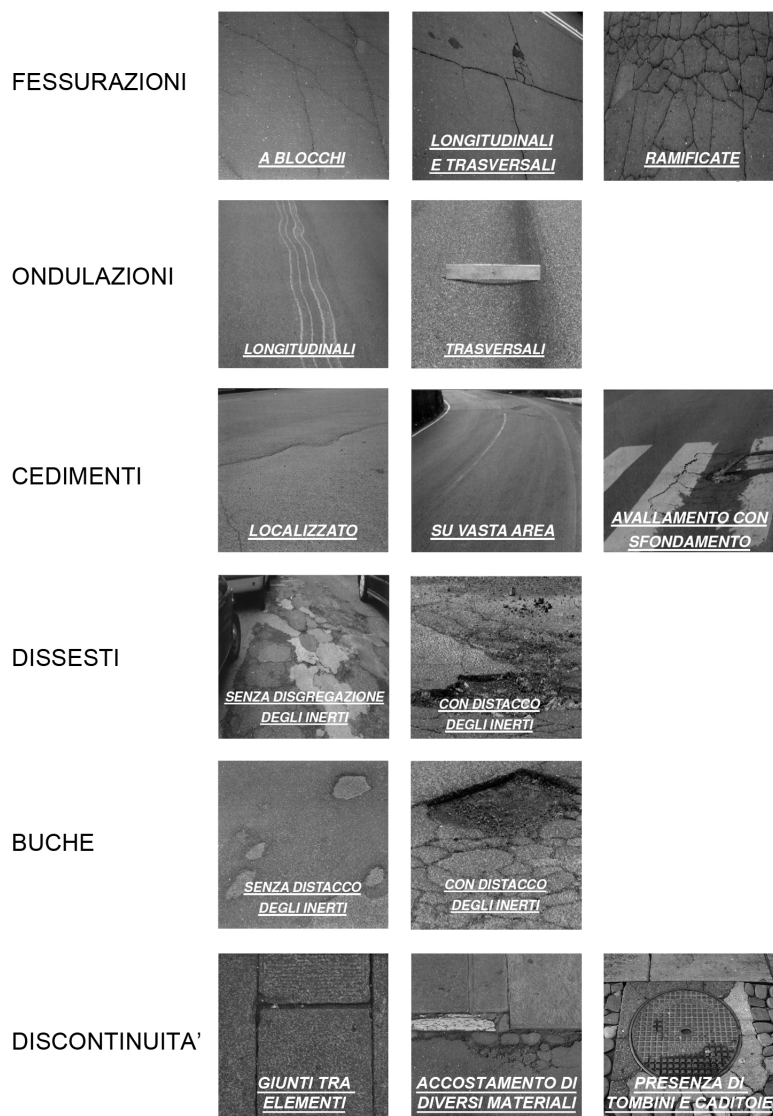


Figura 7.6 – Ammaloramenti e discontinuità che possono determinare irregolarità della superficie stradale

Per la misura della regolarità di una pavimentazione stradale si utilizza un indice standardizzato, l'*International Roughness Index* (IRI), dato dal rapporto tra l'accumulo di spostamento verticale subito dalle sospensioni durante il moto e la distanza percorsa dal veicolo stesso schematizzato secondo il modello *Quarter car*.⁴² Dati la lunghezza del profilo stradale (L), la velocità di marcia del veicolo (v), la quota del punto di equilibrio statico delle masse sospese (Z_s) e delle masse non sospese (Z_u), si definisce l'indice IRI come:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{1}{v} (Z_s - Z_u) dt$$

Il range di variazione del parametro adimensionale IRI, espresso in m/Km o mm/m, è riportato in figura 7.7:

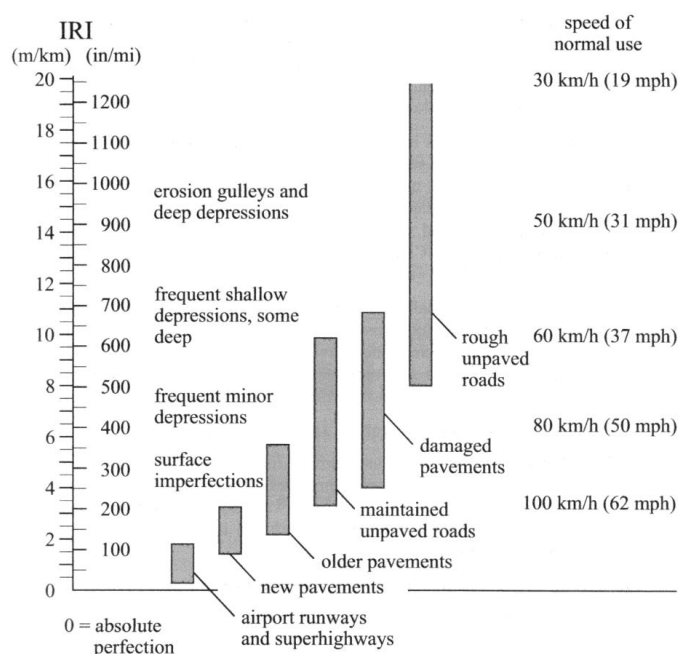


Figura 7.7 – Scala dei valori IRI calcolati su basi di 320 m⁵²

7.1.1.3 Il terreno

La valutazione delle vibrazioni nel terreno è particolarmente complessa a causa della non omogeneità delle caratteristiche meccaniche degli strati che compongono il sottofondo e della presenza di numerosi sottoservizi (reti di distribuzione di energia elettrica, acqua, gas, telefono e internet). Generalmente è possibile applicare la teoria dell'elasticità anche ai terreni, avendo però cura di adottare coefficienti di sicurezza abbastanza elevati e di calibrare i risultati con prove sperimentali in modo da tenere conto della variazione delle costanti elastiche, della densità, delle condizioni di anisotropia e non perfetta elasticità del mezzo reale.^{43,46}

7.1.2 Propagazione delle onde

Le forze dinamiche variabili generate dai veicoli in moto si applicano alla superficie stradale producendo onde tenso-deformative che si propagano nel suolo.⁴¹

Si possono considerare tre diversi tipi di onde (figura 7.8):

- ONDE PRIMARIE (P) di compressione;
- ONDE SECONDARIE (S) di taglio;
- ONDE DI RAYLEIGH (R) di superficie.

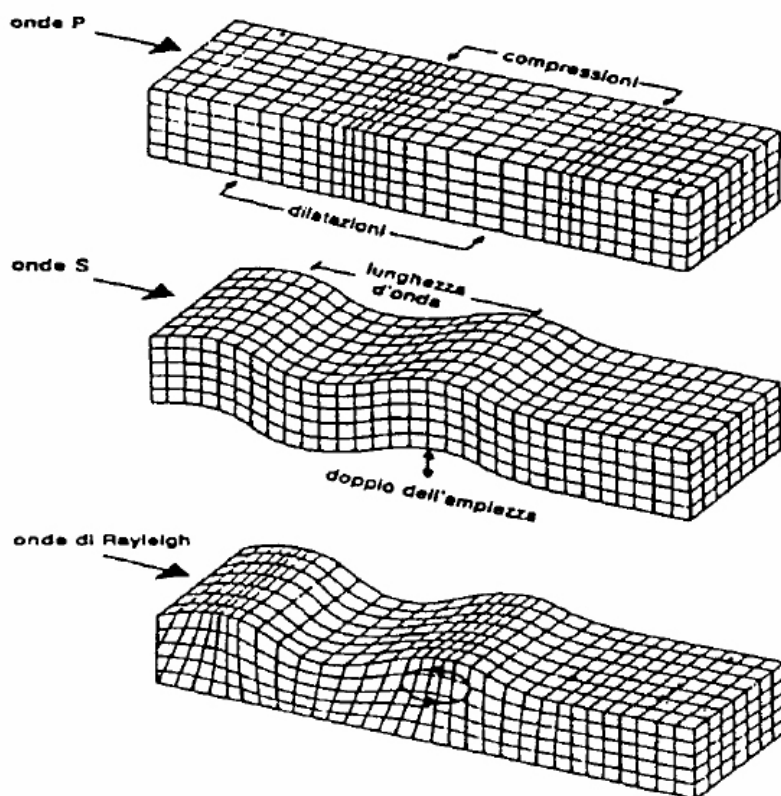


Figura 7.8 – Schema delle onde di tipo P, S, R⁴⁶

Le onde P e S si propagano nello spazio e sono dette di volume, mentre le onde R interessano una regione di spazio limitata e vicina alla superficie. La perturbazione generata da un'onda provoca una deformazione locale del mezzo in cui si propaga. La velocità di propagazione delle onde indotte da traffico stradale dipende dalla densità (ρ), dal **modulo elastico** (E) e dal **coefficiente di Poisson** (ν) del terreno.⁴¹

$$C_P = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

velocità di propagazione delle onde P

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

velocità di propagazione delle onde S

$$C_R = f(\nu) \cdot C_S$$

velocità di propagazione delle onde R

Tra le velocità di propagazione vale la relazione $C_P > C_S > C_R$.

Per terreni che presentano stratificazione prevalentemente orizzontale, la maggior parte dell'energia di vibrazione viene trasmessa attraverso le onde di superficie: la loro attenuazione avviene tramite sia uno smorzamento geometrico, sia l'assorbimento di energia da parte dei materiali costituenti il terreno.⁴³

Se si considera un terreno ideale, elastico e isotropo, l'attenuazione che subiscono le vibrazioni è dovuta al solo smorzamento geometrico: le onde di volume P e S decrescono in ampiezza più ci si allontana dalla sorgente; le onde di superficie R, invece, decadono lentamente nel caso di una sorgente di tipo puntuale, mentre si mantengono invariate nel caso di sorgente lineare.⁴³ Dal momento che il profilo stradale può essere schematizzato come una sorgente lineare, le onde di Rayleigh risultano essere prevalenti nel fenomeno di propagazione delle vibrazioni. Tuttavia le onde P e S possono raggiungere grandi profondità, provocando diffrazioni dei fronti d'onda negli strati più profondi e compatti del terreno.⁴³ Il terreno, però, non è un mezzo ideale e allo smorzamento geometrico va aggiunta anche l'ulteriore attenuazione delle onde dovuta alla dissipazione di energia durante l'attraversamento dei materiali che compongono gli strati di terreno.

7.1.3 Ricezione delle vibrazioni da parte degli edifici

Le vibrazioni, propagandosi attraverso il terreno, raggiungono le fondazioni degli edifici prospicienti alla strada e si trasmettono in maniera amplificata alle strutture. Le sollecitazioni dinamiche associate alle vibrazioni si sommano, quindi, ai carichi statici permanenti e variabili, alterando le condizioni di equilibrio fra azioni e forze resistenti.⁴¹

Le azioni dinamiche producono spostamenti e deformazioni che si presentano con intensità maggiore a seconda delle caratteristiche di frequenza, ampiezza e durata dell'onda sollecitante (figura 7.9).

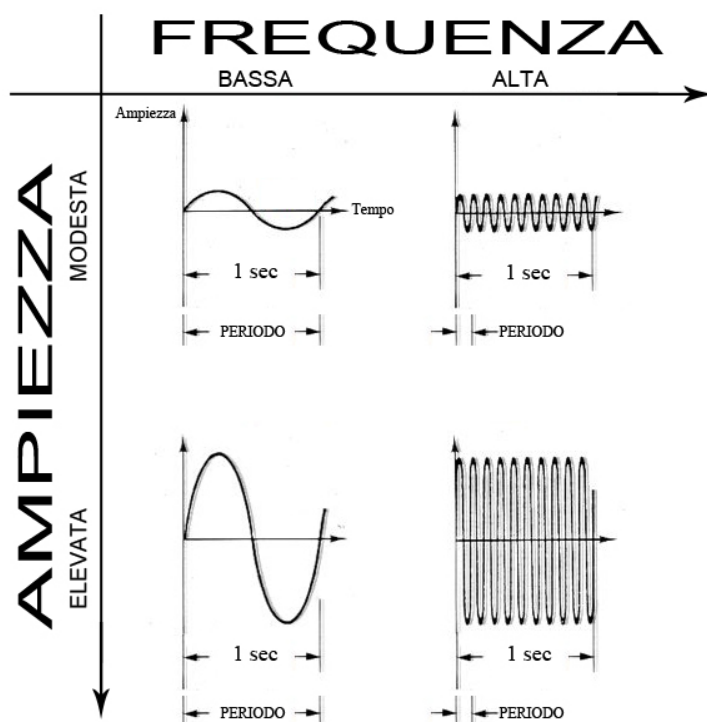


Figura 7.9 – Confronto fra onde di diversa frequenza e ampiezza

Quando le vibrazioni indotte da traffico stradale si propagano fino alle fondazioni di un edificio, esso inizia a oscillare: se la frequenza dell'onda sollecitante è comparabile a quella propria dell'edificio, si possono manifestare fenomeni di **risonanza**. Le vibrazioni prodotte dal traffico stradale sono in genere a bassa frequenza e possono, quindi, indurre grandi sollecitazioni poiché sono dello stesso ordine di grandezza delle frequenze proprie degli elementi strutturali, che dipendono dai parametri fisici e meccanici dei materiali (tabella 7.1). Inoltre gli elementi strutturali degli edifici storici sono generalmente più rigidi rispetto a quelli più moderni in conglomerato cementizio armato o in acciaio e ciò comporta un'ulteriore amplificazione del fenomeno di risonanza.⁴¹

ELEMENTI STRUTTURALI	FREQUENZA PROPRIA [Hz]
Travi	5÷50 Hz
Controsoffitti	10÷20 Hz
Solai, Tramezzi	10÷30 Hz
Finestre	10÷100 Hz

Tabella 7.1 – Frequenze proprie dei principali elementi strutturali^{41,46}

A una oscillazione con elevata ampiezza o di maggiore durata conseguono notevoli sforzi e deformazioni a cui viene sottoposta la struttura dell'edificio. E' necessario considerare anche il numero di reiterazioni del fenomeno vibratorio complessivo, in quanto continue vibrazioni possono causare danni per rottura a **fatica** dei materiali.

7.2 I meccanismi di danno prodotti dalla propagazione delle vibrazioni negli edifici

Le vibrazioni possono indurre all'interno dei materiali da costruzione carichi dinamici superiori alla soglia di resistenza a trazione, innescando quindi l'insorgere di lesioni.⁵³ I primi danni compaiono nei materiali con minore resistenza, come quelli di rivestimento, e nei punti particolarmente sensibili, dove sono già presenti elevate sollecitazioni statiche (dovute alla presenza dei carichi di progetto) e azioni coattive (dilatazioni termiche, effetti di ritiro del materiale). Dal momento che i materiali da costruzione resistono soprattutto a compressione, il superamento di tali resistenze si verifica solo a seguito di sforzi di grande intensità, come quelli provocati dalle onde sismiche.⁵³

I danni indotti dalle vibrazioni possono, quindi, essere di entità variabile e vengono classificati in base alla loro pericolosità:⁵⁴

→ DANNI MINORI

se coinvolgono solo elementi con funzione architettonica ed estetica, comportando generalmente lievi fessurazioni o distacchi localizzati negli intonaci e peggioramento di lesioni già esistenti;

→ DANNI STRUTTURALI

se riguardano gli elementi portanti dell'edificio, con possibile perdita di stabilità.^{53,54}

Le vibrazioni da traffico è improbabile che provochino danni strutturali, poiché le frequenze proprie di travi e pilastri sono in genere inferiori a 20÷40 Hz, mentre sono molto frequenti i danni agli elementi architettonici secondari (figura 7.10).

Le vibrazioni provocate dagli eventi sismici, al contrario, possono causare diversi meccanismi di danno che spesso compromettono la fruibilità dell'edificio (figura 7.11).

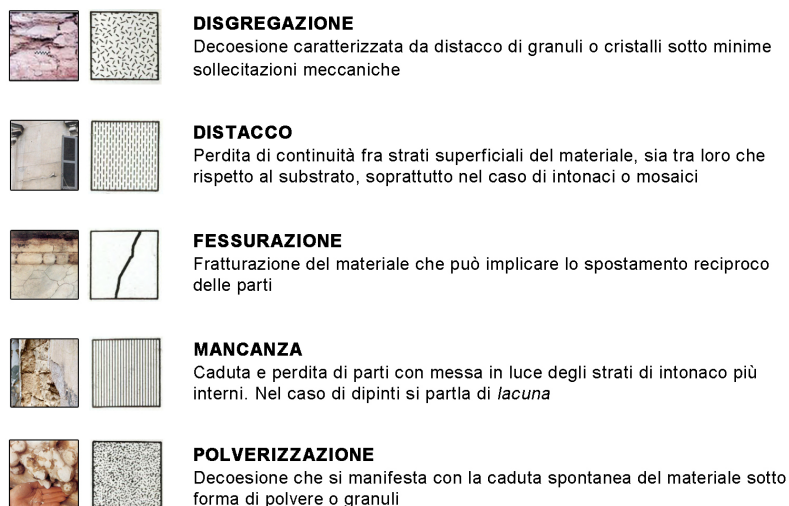
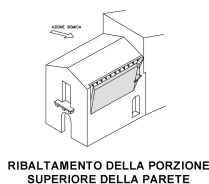


Figura 7.10 – Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei in seguito all'insorgenza di danni minori, Normal 1/88

MECCANISMO DI DANNO DA AZIONE SISMICA DI 1° TIPO

RIBALTAMENTO



MECCANISMO DI DANNO DA AZIONE SISMICA DI 2° TIPO

FESSURAZIONI DIAGONALI



COMBINAZIONE DI 1° E 2° TIPO

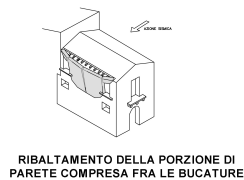


Figura 7.11 – Meccanismi di danni strutturali indotti dalle onde sismiche

In conclusione, le vibrazioni provocate da sorgenti differenti dalle scosse sismiche inducono generalmente danni minori che non interessano gli elementi strutturali principali ma che possono contribuire ad aggravare lo stato di tensione esistente.⁵³

7.3 Il quadro normativo

La normativa italiana, pur indicando valori di riferimento, non fissa limiti quantitativi assoluti per i livelli di vibrazione che possono arrecare danni agli edifici perché considera troppo marcata la varietà di casistiche riportate in letteratura e da altre normative.⁵⁴

Le normative riportano soglie di riferimento per le vibrazioni ammissibili nelle strutture basandosi sul valore del picco di velocità di vibrazione in direzione verticale (tabella 7.2): le soglie più cautelative sono assunte per gli edifici storici e monumentali, dato che sono maggiormente vulnerabili ai danni da fatica e anche danni non strutturali possono compromettere l'integrità delle opere d'arte.⁵⁴

Categoria	Tipi di Strutture	Velocità di vibrazione [mm/s]*			
		Misura alle fondazioni			Misura al Pavimento dell'ultimo piano Frequenze diverse
		Campi di frequenza [Hz] <10 10-50 50-100**			
1	Edifici commerciali industriali e simili	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3-8	8-10	8

* Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura

** Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna

Tabella 7.2 – Valori ammissibili del picco di velocità di vibrazione in direzione verticale, UNI 9916

Si riporta di seguito il quadro normativo internazionale e italiano sulla valutazione delle vibrazioni, sugli effetti indotti negli edifici e sul disturbo arrecato alle persone.

7.3.1 Valutazione delle vibrazioni e misure strumentali

International Organization for Standardization

ISO 4866 (1990) *Evaluation and measurement for vibration in buildings*

Ente Nazionale Italiano di Unificazione

UNI 8042 (1993) *Misurazioni di urti e vibrazioni. Veicoli terrestri. Criteri di presentazione dei dati misurati*

UNI 11048 (2003) *Vibrazioni meccaniche ed urti: metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo*

UNI 11819 (2004) *Misurazione dell'influenza delle superfici stradali sul rumore da traffico. Metodo statistico applicato al traffico passante*

UNI 9916 (2004) *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*

UNI 1032 (2004) *Vibrazioni meccaniche – Esame di macchine mobili allo scopo di determinare i valori di emissione vibratoria*

British Standards

BS 7385 (1990) *Evaluation and measurement for vibration in buildings*

7.3.2 Effetti delle vibrazioni sugli edifici

International Organization for Standardization

ISO 4866 (1990) *Evaluation and measurement for vibration in buildings*

Deutsches Institut für Normung

DIN 4150-3 (1999) *Structural vibration: effects of vibration on structures*

Ente Nazionale Italiano di Unificazione

UNI 9916 (2004) *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*

7.3.3 Criteri di valutazione del disturbo arrecato alle persone

International Organization for Standardization

ISO 2631-2 (1989) *Mechanical vibration and shock: evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*

Ente Nazionale Italiano di Unificazione

UNI 28041 (1994) *Risposta degli individui alle vibrazioni. Strumenti di misurazione*

UNI 10570 (1997) *Prodotti per l'isolamento delle vibrazioni. Determinazione delle caratteristiche meccaniche di materassini e piastre*

UNI 1793 (1999) *Dispositivi per la riduzione del rumore da traffico stradale*

UNI 11048 (2003) *Vibrazioni meccaniche ed urti: metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo*

UNI 9916 (2004) *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*

American National Standards Institute

ANSI S3.29 (1983) *Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings*

British Standards

BS 6472 (1984) *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*

8 TECNICHE DI ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI

Le pavimentazioni stradali a elementi lapidei sono caratterizzate da numerose irregolarità superficiali e inducono vibrazioni maggiori rispetto alle pavimentazioni in conglomerato bituminoso indipendentemente dal tipo di sorgente.⁵⁵ L'effetto di attenuazione del manto in conglomerato bituminoso è maggiore soprattutto nei punti a breve distanza dall'origine della perturbazione e diminuisce man mano che ci si allontana dalla zona di eccitazione.⁵⁵ Tuttavia le pavimentazioni in masselli soddisfano maggiormente le esigenze estetiche e architettoniche richieste per le applicazioni nei centri storici: risulta, quindi, necessario studiare possibili tecniche di attenuazione delle vibrazioni da traffico.

8.1 Le tipologie di pacchetti stradali: flessibili, semirigidi e rigidi

Gli strati superficiali di un pacchetto stradale devono garantire elevata resistenza meccanica alle azioni generate dal traffico, una buona aderenza al contatto tra pavimentazione e pneumatico, drenaggio e impermeabilità. La resistenza ai fenomeni di fatica e all'**ormaiamento** è affidata allo strato di base, mentre lo strato di fondazione costituisce il mezzo di ripartizione dei carichi al terreno e un filtro per evitare la risalita di acqua ed elementi a grana fine. Le pavimentazioni stradali sono classificate in tre tipologie a seconda dei materiali che compongono i diversi strati (figure 8.1÷8.4):

- PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE
costituita da strati di conglomerato bituminoso per lo strato d'usura, di collegamento (binder) e di base, e da una fondazione in stabilizzato granulometrico. Il pregio maggiore delle pavimentazioni flessibili è la rapidità di posa in opera e di manutenzione in caso di ammaloramenti;
- PAVIMENTAZIONE SEMIRIGIDA
costituita da uno strato di base in misto cementato di maggiore rigidezza rispetto al conglomerato bituminoso;
- PAVIMENTAZIONE RIGIDA
costituita da uno strato d'usura realizzato con una lastra di calcestruzzo posata su una base di misto cementato. Garantiscono migliori prestazioni di resistenza ai carichi perché il materiale è più rigido.

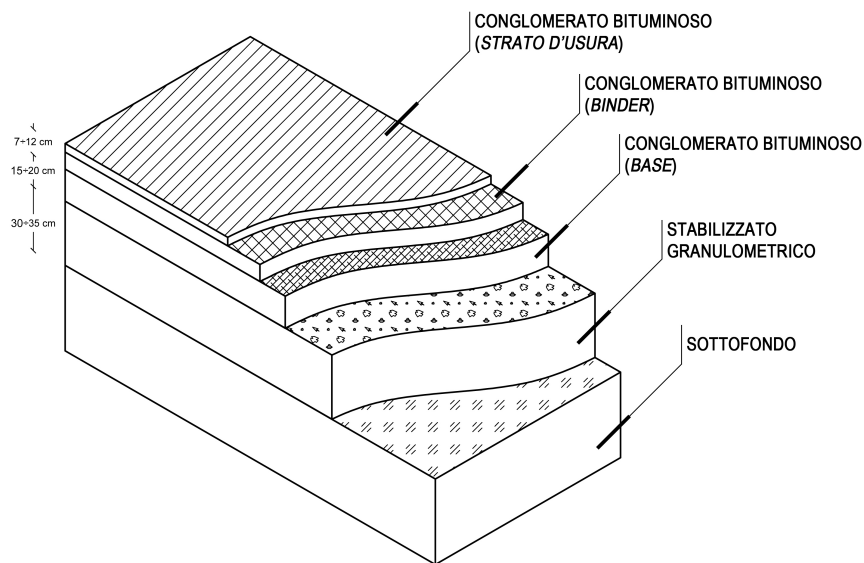


Figura 8.1 – Sezione di una pavimentazione stradale flessibile

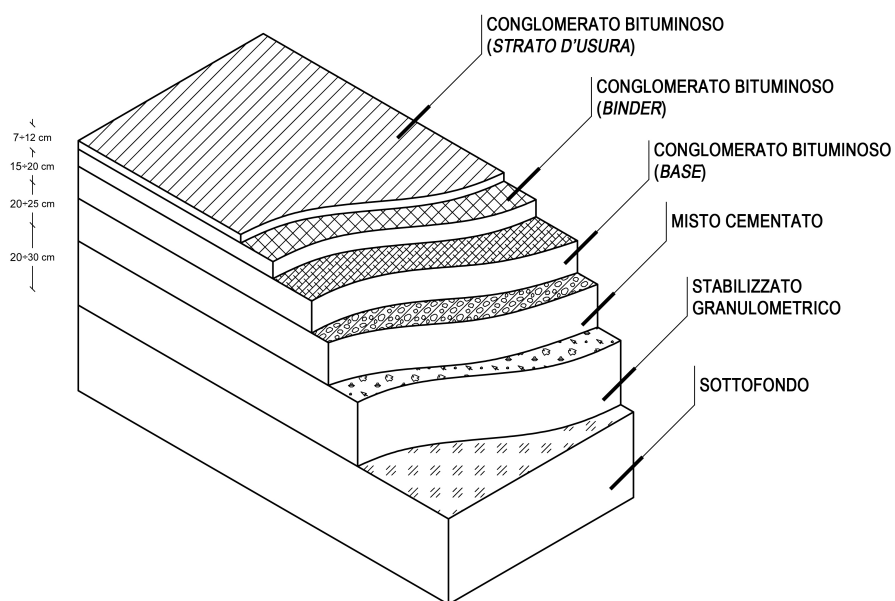


Figura 8.2 – Sezione di una pavimentazione stradale semirigida con sovrastruttura in conglomerato bituminoso

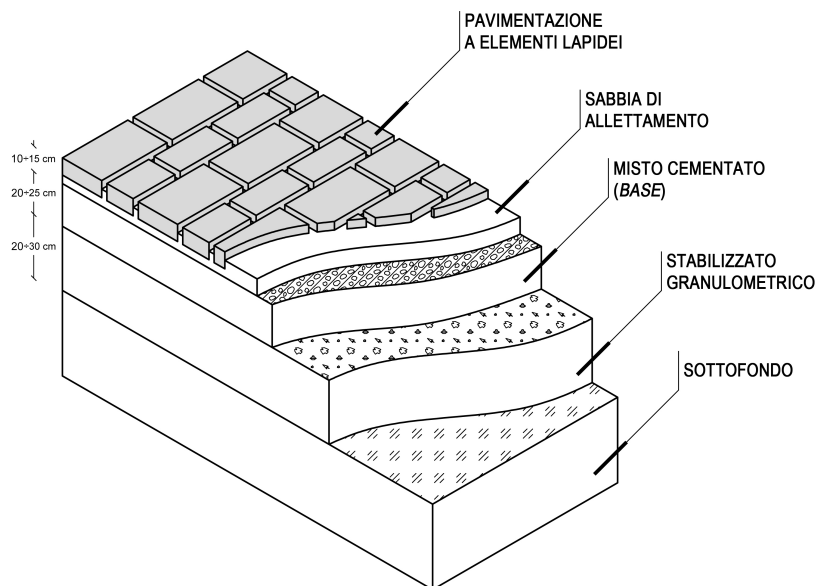


Figura 8.3 – Sezione di una pavimentazione stradale semirigida con sovrastuttura in elementi lapidei

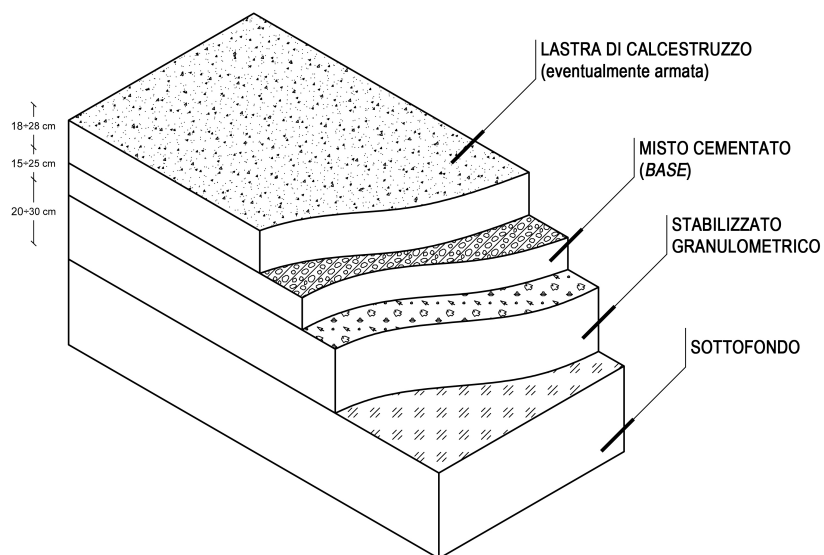


Figura 8.4 – Sezione di una pavimentazione stradale rigida

8.2 Gli interventi di mitigazione

Gli interventi di mitigazione delle vibrazioni da traffico possono essere:

- attivi, quando si posiziona l'elemento attenuatore nelle vicinanze della sorgente;
- passivi, quando è l'edificio ricevente ad essere protetto.

Le due tipologie rispondono a due differenti esigenze: la protezione attiva consente di ridurre le emissioni, mentre quella passiva serve a schermare un edificio sensibile da diverse sorgenti (figura 8.5).⁵⁶

Nei paragrafi seguenti vengono illustrati i principali interventi noti in letteratura per attenuare il problema delle vibrazioni indotte da traffico stradale.

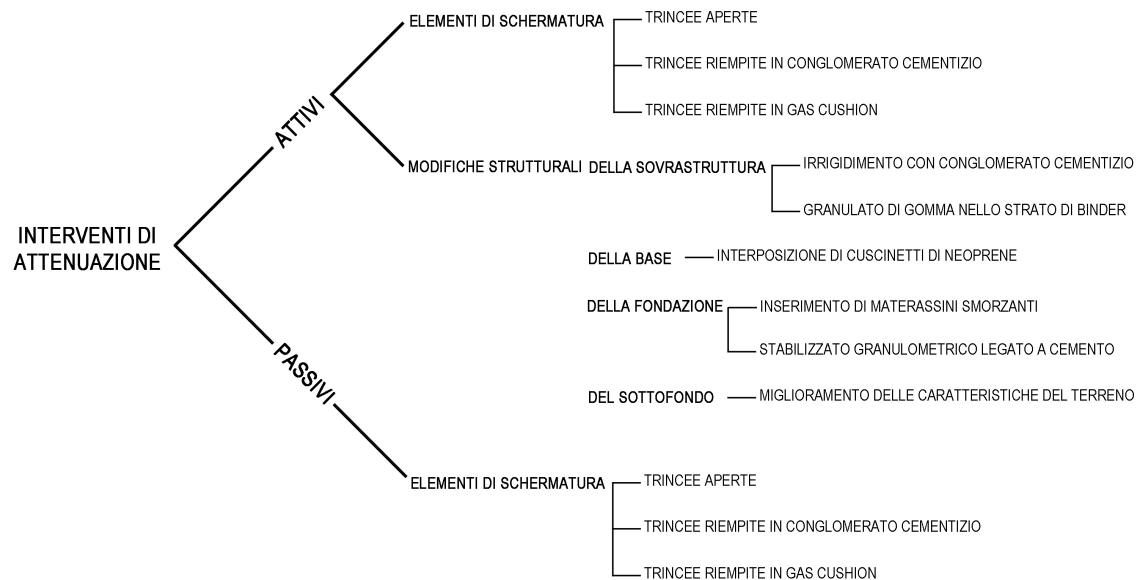


Figura 8.5 – Tipologie di interventi di attenuazione delle vibrazioni da traffico

8.2.1 Elementi di schermatura

L'inserimento di una trincea lungo il tratto sorgente-ricevitore consente di attenuare il fenomeno vibratorio attraverso la presenza di una discontinuità di materiale nel terreno che interrompe la propagazione delle onde. Tale discontinuità può essere ottenuta tramite trincee aperte oppure barriere riempite con materiali di maggior rigidità rispetto al terreno, come ad esempio il conglomerato cementizio. Nel caso delle trincee senza riempimento il parametro che influenza di più l'effetto di attenuazione delle onde è la profondità dell'elemento schermante⁵⁷: la propagazione

delle onde prevalenti nel fenomeno vibratorio indotto da traffico stradale avviene, infatti, in superficie. Il parametro che viene utilizzato è il valore lineare della profondità della trincea (d) normalizzato rispetto alla lunghezza d'onda delle onde di Rayleigh (L_R):

$$D = \frac{d}{L_R}.$$

Per profondità minori di $D = 0,8$ anche la larghezza della barriera (W) influisce sulla mitigazione delle vibrazioni, mentre per trincee aperte profonde essa può essere trascurata. Per le trincee riempite con materiali schermanti sono fattori importanti sia D che W , oltre che le densità del terreno e dell'elemento di barriera. Le trincee riempite risultano meno efficaci di quelle aperte perché le onde incidenti sul materiale di riempimento potrebbero trasmettersi comunque nella zona retrostante la trincea. Un'ulteriore soluzione tecnologica utilizzata nel Nord Europa associa il miglior rendimento delle trincee aperte al minor impatto ambientale di quelle riempite: si tratta del sistema *gas cushion* costituito da membrane a forma di cuscino contenenti gas e collegate a pannelli in calcestruzzo armato precompresso per facilitare la posa in opera (figura 8.6).⁵⁶ Il sistema è impermeabilizzato con un diaframma costituito da cemento in gel bentonitico (figura 8.7).



Figura 8.6 – Installazione di una trincea in *gas cushion* lungo il tracciato di una ferrovia a Düsseldorf, 1990⁵⁸

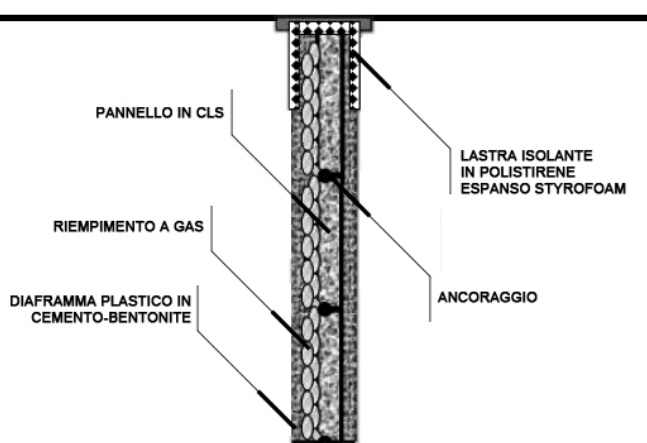


Figura 8.7 – Trincea in *gas cushion system*⁵⁸

Il principale svantaggio dei sistemi a trincea è lo spazio necessario per l'installazione, in quanto in ambito urbano sono presenti molti sottoservizi e gli edifici possono essere troppo vicini al margine stradale.

8.2.2 Modifiche strutturali della sovrastruttura

IRRIGIDIMENTO TRAMITE SOSTITUZIONE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO CON CONGLOMERATO CEMENTIZIO

L'aumento della rigidità della pavimentazione attraverso l'inserimento di strati di materiale a maggiore compattezza, come il conglomerato cementizio, comporta una significativa riduzione delle vibrazioni.⁴²

La differenza di comportamento fra le pavimentazioni in conglomerato bituminoso e quelle in conglomerato cementizio è stata individuata sperimentalmente nel corso di una campagna di rilevazione condotta su sovrastrutture situate su terreni dalle diverse caratteristiche meccaniche (argille, sabbie, ghiaie e rocce).^{42,59} I risultati dello studio mostrano che le pavimentazioni in conglomerato cementizio, più rigide, garantiscono un'attenuazione delle vibrazioni maggiore rispetto a quelle in conglomerato bituminoso. Il maggiore rendimento è evidente soprattutto in prossimità della sorgente della perturbazione, fino a una distanza di circa 10 m. Man mano che ci si allontana dalla zona di generazione, la differenza di efficacia fra i due sistemi costruttivi diminuisce.

GRANULATO DI GOMMA NELLO STRATO DI BINDER

Per ottimizzare le proprietà smorzanti della pavimentazione stessa, sono stati studiati recentemente conglomerati bituminosi speciali contenenti granulato di gomma proveniente dal recupero di pneumatici usati. In Italia circa il 66% degli pneumatici dismessi non viene riciclato, ma viene portato in discarica e smaltito con rilevanti costi di raccolta, trasporto e trattamento (figura 8.8).⁶⁰



Figura 8.8 – Pneumatici dismessi in discarica⁶¹

Generalmente i conglomerati utilizzati nello strato di collegamento (*binder*) sono costituiti da una miscela di aggregati a grana grossa, sabbia e filler, miscelati a caldo con legante bituminoso.⁶² Il granulato di gomma, sotto forma di polverino, viene aggiunto alla miscela con proporzioni di solito comprese fra il 18÷25% in peso di bitume: la gomma, reagendo con il legante, rammollisce e rigonfia conferendo al bitume maggiore elasticità e flessibilità (figure 8.9, 8.10).⁴⁶ Per ritardare l'invecchiamento della gomma vengono spesso impiegati additivi antiossidanti e riempitivi.⁴⁶

L'utilizzo nello strato di binder di una formulazione di conglomerato bituminoso con granulato di gomma è finalizzato alla limitazione dell'insorgere delle vibrazioni e non solo al loro smorzamento. In questo modo si riescono ad ottenere pavimentazioni flessibili intrinsecamente anti-vibranti, applicabili anche a pacchetti esistenti con caratteristiche sia buone, sia medio-basse.^{60,62} L'ulteriore vantaggio di questa soluzione tecnologica è quello di poter impiegare materiale riciclato, diminuendo anche il consumo di aggregati nella preparazione del conglomerato bituminoso. All'interno dello strato in cui è introdotto, infatti, il granulato di gomma costituisce l'ossatura del conglomerato bituminoso insieme agli inerti di varia pezzatura.

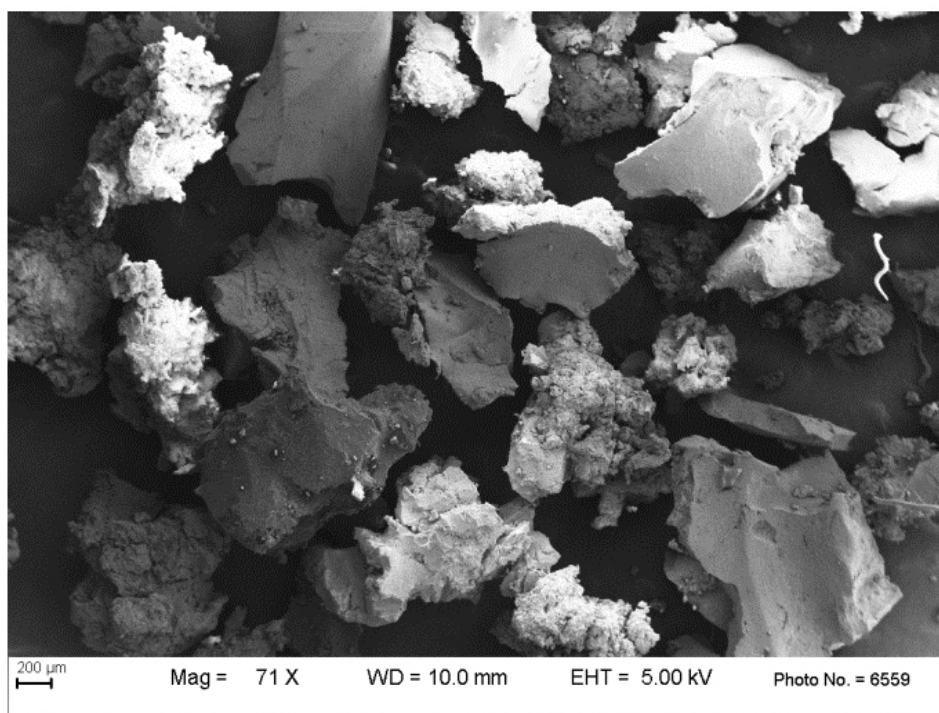


Figura 8.9 – Ingrandimento al microscopio elettronico (71X) di un campione di polverino di gomma⁶¹

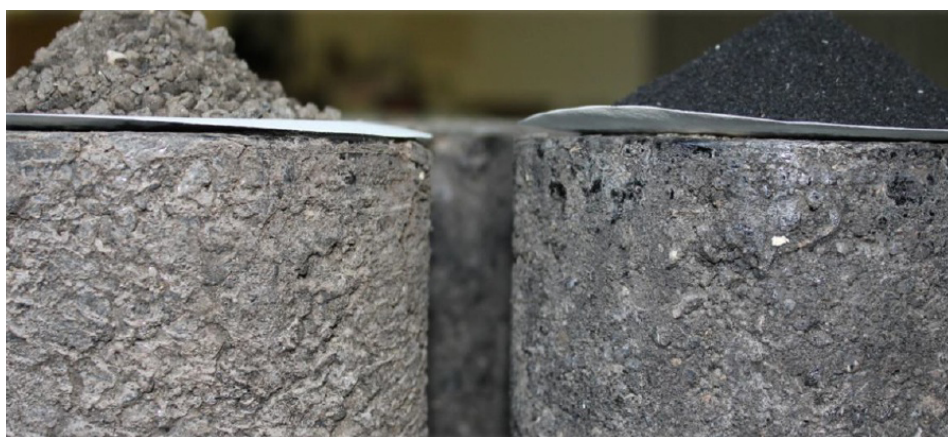


Figura 8.10 – Confronto fra un conglomerato bituminoso tradizionale (sinistra) e uno con aggiunta di granulato di gomma (destra)⁶¹

8.2.3 Modifiche strutturali dello strato di base

INTERPOSIZIONE DI CUSCINETTI DI NEOPRENE FRA LA SOVRASTRUTTURA E LO STRATO DI FONDAZIONE

La capacità di attenuare le vibrazioni si può ottenere anche attraverso l'interposizione di elementi smorzanti fra la pavimentazione e lo strato di fondazione. Un esempio di questo tipo di soluzione tecnologica è stato attuato a Roma nel 1970 per la protezione del palazzo della Farnesina: sotto la pavimentazione stradale in conglomerato bituminoso sono state collocate piastre prefabbricate collegate a una struttura di travi in calcestruzzo armato precompresso appoggiate su cuscinetti smorzanti in neoprene. Lo strato di fondazione è stato realizzato attraverso una soletta in calcestruzzo armato (figura 8.11).⁴⁶

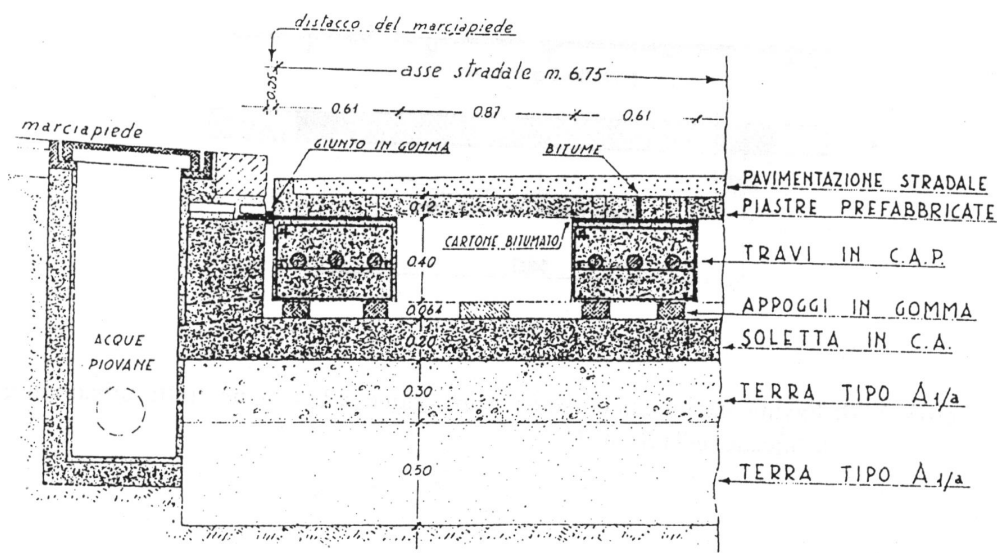


Figura 8.11 – Sezione del pacchetto stradale realizzato nel 1970 per la protezione del palazzo della Farnesina⁴⁶

8.2.4 Modifiche strutturali della fondazione

INSERIMENTO DI MATERASSINI SMORZANTI

L'inserimento di materassini smorzanti in materiale polimerico in corrispondenza della fondazione attenua la propagazione delle vibrazioni grazie ad un effetto barriera generato direttamente all'interno del pacchetto stradale (figura 8.12).

I materassi smorzanti devono essere rivestiti sia superiormente, sia inferiormente con teli impermeabilizzanti in polietilene, sagomati e sigillati, in modo da ottenere una perfetta tenuta all'acqua: la durabilità e la funzionalità dei materassi smorzanti dipendono in modo fondamentale dall'impermeabilità del loro rivestimento.⁶³

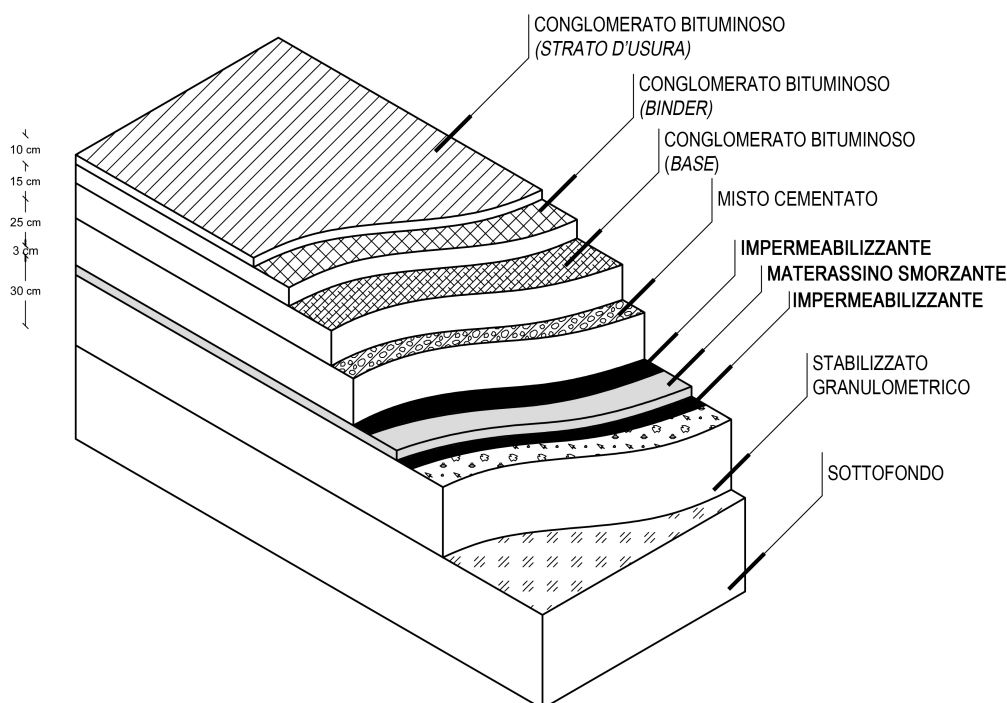


Figura 8.12 – Sezione di pavimentazione semirigida con interposizione di materassino smorzante di 30 mm di spessore tra lo strato di fondazione in misto cementato e quello in stabilizzato granulometrico

Per confinare in maniera più efficace la propagazione delle vibrazioni i materassini smorzanti possono essere risvoltati lungo i fianchi della sovrastruttura (figure 8.13, 8.14).

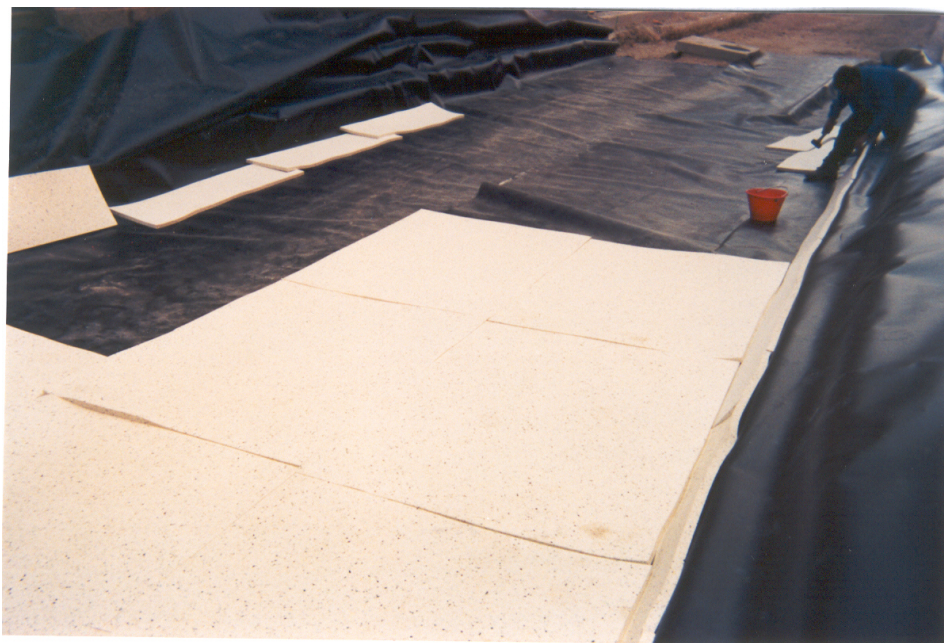


Figura 8.13 – Materassino antivibrante risvoltato⁶³



Figura 8.14 – Progetto di riqualificazione della pavimentazione stradale nel centro storico di Demonte (CN): inserimento di un materassino antivibrante risvoltato sopra ad una fondazione in stabilizzato granulometrico⁶³

STABILIZZATO GRANULOMETRICO LEGATO A CEMENTO

Il misto cementato ha caratteristiche meccaniche più elevate rispetto al semplice stabilizzato granulometrico e risulta perciò più rigido. La distribuzione dei carichi prodotti dai veicoli pesanti è più graduale e uniforme attraverso uno strato di fondazione in misto cementato rispetto a uno stabilizzato granulometrico tradizionale.⁶³ In termini di attenuazione del fenomeno vibratorio, il miglioramento dovuto all'irrigidimento si riscontra per tutte le frequenze di vibrazione.⁴²

8.2.5 Modifiche strutturali del sottofondo

MIGLIORAMENTO DELLE CARATTERISTICHE DEL TERRENO

Le caratteristiche del terreno sono fra i fattori predominanti nel fenomeno di propagazione delle vibrazioni indotte da traffico stradale. Una possibile misura di attenuazione è l'aumento del livello di compattazione del terreno di sottofondo, ma la realizzazione di un intervento di questo tipo risulta di difficile applicazione in ambito urbano poiché particolarmente costosa e impattante sul contesto ambientale.

8.3 Efficacia degli interventi di attenuazione su un modello di simulazione della pavimentazione urbana

L'efficacia dei diversi interventi nel ridurre gli effetti delle vibrazioni indotte da traffico stradale è confermata da numerosi studi sperimentali. Si riportano alcuni risultati ottenuti durante una ricerca condotta dal Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna per valutare gli effetti delle vibrazioni sul degrado di due edifici di elevato pregio artistico e architettonico nel centro storico di Bologna (figura 8.15).⁵⁵

Attraverso la modellazione teorica alle differenze finite è stato possibile confrontare gli effetti di attenuazione delle soluzioni progettuali considerate quantificando la riduzione percentuale dei picchi di velocità (R_f) rispetto ad un caso standard privo di interventi attenuatori:

$$R_f = (1 - A_r) \cdot 100$$

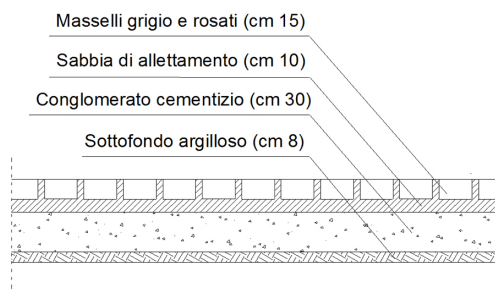
dove A_r è il rapporto tra le velocità massime registrate nello stesso punto in presenza e in assenza di intervento.

8.3 Efficacia degli interventi di attenuazione su un modello di simulazione della pavimentazione urbana

PALAZZO RANGONI-MACHIAVELLI



.sviluppo prevalente in altezza
 .sovrastuttura stradale di Via Farini in elementi lapidei
 .quota del piano viabile a -1 m dal sottoportico



EX CONVENTO SAN MATTIA



.sviluppo prevalente in larghezza
 .sovrastuttura di Via Sant'Isaia in congl. bituminoso
 .quota del piano viabile a -15 cm dal sottoportico

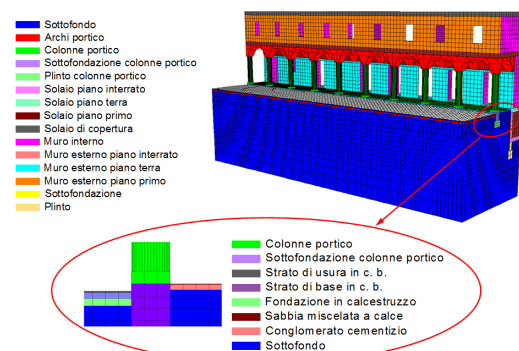
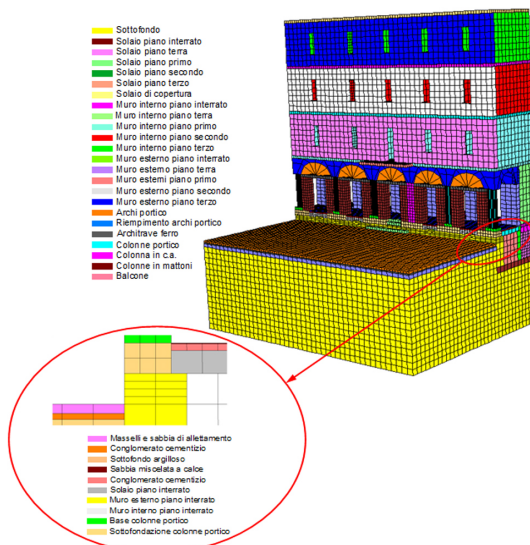
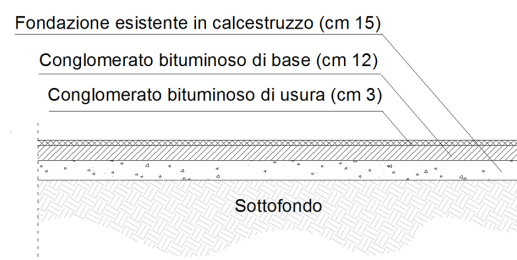


Figura 8.15 – Modellazione computerizzata di Palazzo Rangoni-Machiavelli in via Farini e dell'ex Convento di San Mattia in via Sant'Isaia

In seguito all'analisi dei dati di traffico forniti dal Comune di Bologna è stato determinato il carico dinamico trasmesso alla pavimentazione, considerando la sollecitazione generata da un autobus a pieno carico con le seguenti caratteristiche:

- 65% del carico complessivo distribuito sull'asse posteriore;
- forza risultante su ogni singola ruota pari a 78 kN;
- frequenza di applicazione della sollecitazione pari a 20 Hz, sulla base della velocità media di passaggio dei veicoli.

Nel caso della sovrastruttura in elementi lapidei il carico è stato incrementato del 20% per simulare gli effetti dinamici dovuti alle irregolarità della superficie rispetto a quella in conglomerato bituminoso.⁵⁵

Una volta costruita la simulazione con le caratteristiche specifiche dei materiali da rappresentare, sono stati scelti 2 punti di rilevazione sulla superficie del modello, in corrispondenza del primo piano dell'edificio (punto 40) e nel punto più vicino alla sorgente di disturbo (punto 17) (figura 8.16).

PALAZZO RANGONI-MACHIAVELLI

EX CONVENTO SAN MATTIA

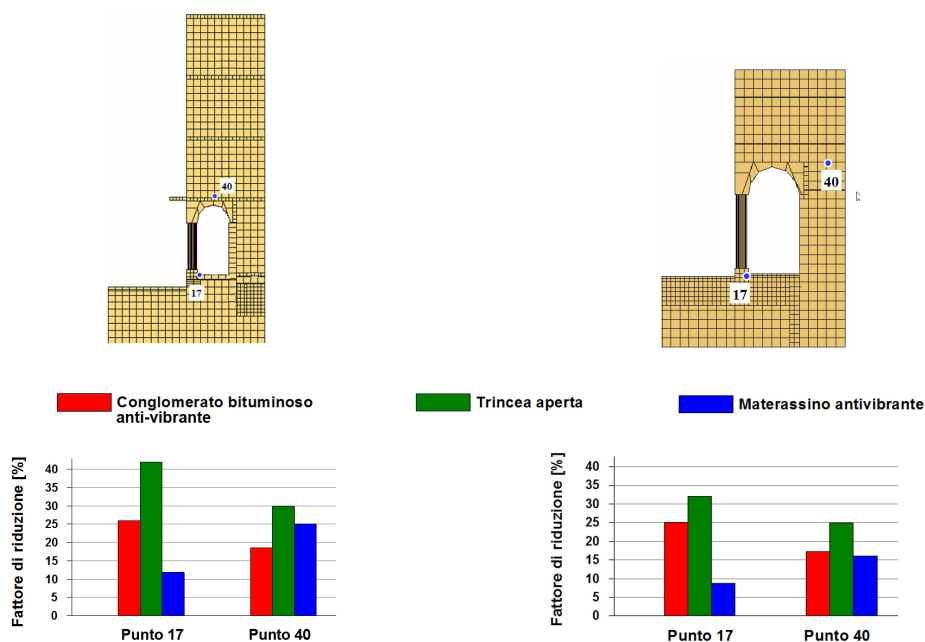


Figura 8.16 – Fattori di riduzione percentuale della velocità di picco⁵⁵

8.3 Efficacia degli interventi di attenuazione su un modello di simulazione della pavimentazione urbana

Lo studio conferma l'efficacia degli interventi di attenuazione considerati in quanto consentono tutti di ottenere un abbattimento dell'intensità del fenomeno vibratorio del 10÷45% nel caso di pavimentazione stradale a elementi lapidei, e del 5÷35% per pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Il sistema che garantisce la migliore resa in entrambi i modelli è la realizzazione di una trincea a fianco della sovrastruttura parallelamente all'asse stradale: i benefici maggiori si riscontrano al di là della trincea stessa (punto 17), dove si crea una zona protetta dalle vibrazioni la cui ampiezza è funzione della profondità della barriera.⁵⁵ Un intervento di questo tipo è, però, di difficile applicazione in ambito urbano a causa della presenza di numerosi sottoservizi. I fattori di riduzione per la soluzione con materassino smorzante sono maggiori quanto più il punto di rilievo è distante dalla zona di eccitazione: l'inserimento di un materassino antivibrante risvoltato produce, quindi, benefici maggiori nei punti più lontani dalla sovrastruttura stradale.

9 LE INDAGINI DIAGNOSTICHE CONDOTTE SULL'ACCADEMIA MILITARE DI MODENA

In seguito ad alcuni distacchi di intonaco dagli affreschi della volta del Salone d'onore dell'Accademia militare di Modena, venne programmata un'analisi computerizzata all'infrarosso per il rilievo delle lesioni. Le indagini furono affidate alla ditta Giancarlo Maselli S.r.l. Diagnostica & Engineering fra agosto 2010 e gennaio 2011. Per verificare se le lesioni registrate durante la fase di analisi termografica fossero provocate dalle vibrazioni indotte dal traffico stradale fu richiesta alla stessa ditta anche un'indagine diagnostica dinamico-strutturale con rilievo delle frequenze di vibrazione, realizzata a partire da febbraio 2011.

9.1 Analisi termografica all'infrarosso sulle volte del Salone d'Onore dell'Accademia militare di Modena

L'analisi termografica permette di visualizzare le imperfezioni di facciata sui prospetti di un edificio (distacchi di intonaco, infiltrazioni di acqua e zone affette da umidità, difetti di isolamento termico) in modo non distruttivo e non intrusivo: le termocamere, infatti, individuano i valori assoluti e le variazioni di temperatura dei corpi indipendentemente dalla loro illuminazione nel campo del visibile. L'oggetto inquadrato dalla termocamera è caratterizzato principalmente dal suo calore irradato ed è quindi indipendente dalle condizioni di luminosità circostanti.⁶⁴

La radiazione termica, emessa a causa dei moti vibratorii delle molecole di un corpo, è la parte dello spettro elettromagnetico corrispondente alle lunghezze d'onda comprese fra $(0,1 \div 100) \cdot 10^{-6}$ m: essa include l'intera radiazione visibile e infrarossa e parte della radiazione ultravioletta (figura 9.1). Ogni corpo che si trova a temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazione termica.

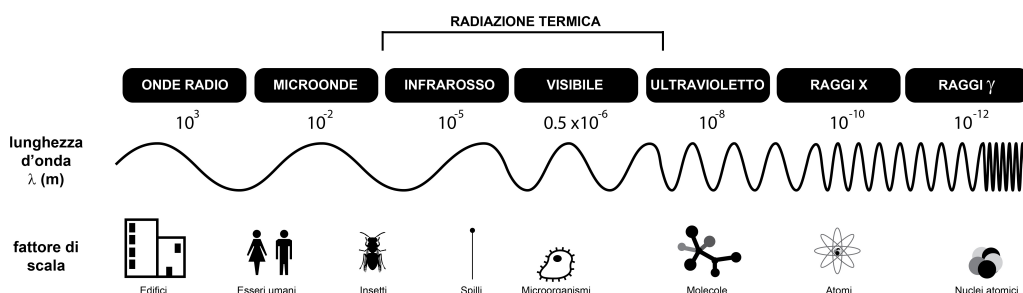


Figura 9.1 – La radiazione termica all'interno dello spettro elettromagnetico

Le termocamere sono sensibili alla radiazione infrarossa e rilevano l'energia emessa dai corpi sotto forma di radiazioni: i cambiamenti di intensità del segnale vengono rappresentati attraverso un range di colori che va dal bianco (per i corpi più caldi) al nero (per i corpi freddi).⁶⁴ I materiali semitrasparenti, come l'acqua o il vetro, si lasciano attraversare completamente dalla radiazione visibile, mentre risultano opachi alla radiazione infrarossa. Nell'immagine ottenuta dalla rielaborazione computerizzata dei dati della termocamera si inserisce anche una scala di riferimento che associa i colori alle temperature.

L'esecuzione dell'indagine termografica viene effettuata attraverso una prima fase di riscaldamento delle superfici durante la quale è possibile rilevare le differenziazioni tra i vari tipi di intonaci ed eventuali distacchi, le lesioni profonde (anche se risarcite con stuccatura) e l'umidità residua. Durante la seconda fase di raffreddamento e di rilascio del calore da parte della superficie è possibile rilevare la presenza di difetti sugli elementi architettonici al di sotto degli strati di intonaco.⁶⁵

Le immagini termografiche ottenute durante le indagini sugli affreschi del Salone d'Onore dell'Accademia militare hanno una precisione fino a $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (figura 9.2).⁶⁵

Grazie alle elaborazioni computerizzate dei dati sono stati messi in evidenza (figura 9.3):

- distacchi di intonaco localizzati di forma quadrata, circolare o mista;
- distacchi di intonaco in corrispondenza della centina, con difetti termici di forma allungata che seguono l'andamento degli elementi strutturali lignei;
- lesioni sub-superficiali al di sotto delle centine in corrispondenza dei distacchi di intonaco.⁶⁵

9.1 Analisi termografica all'infrarosso sulle volte del Salone d'Onore dell'Accademia militare di Modena

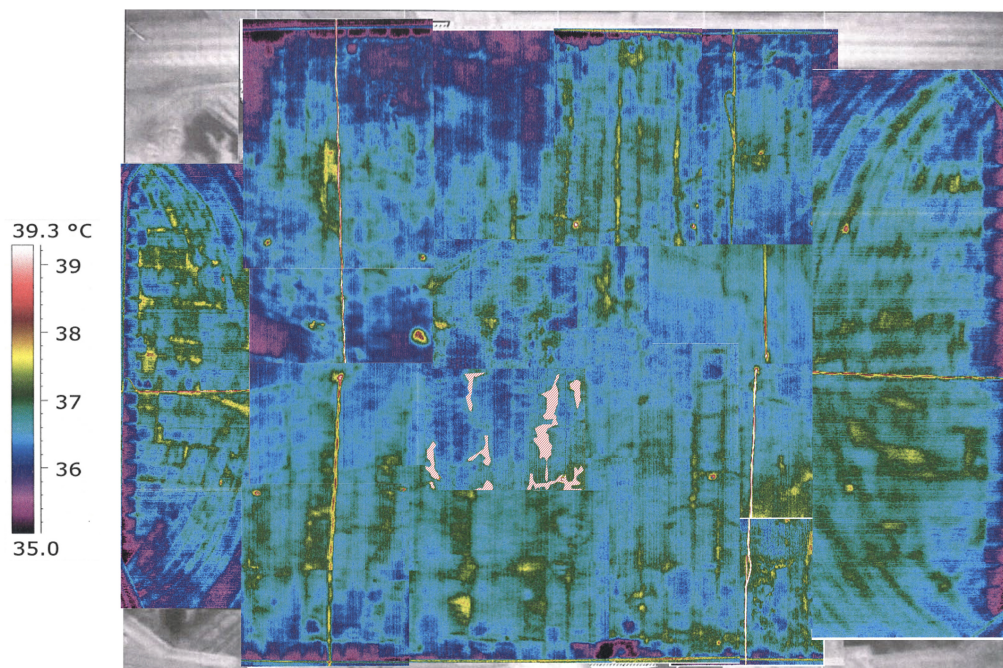


Figura 9.2 – Quadro d'unione delle immagini termografiche riprese con termocamera Professional Camera PM695 della Flir System ed elaborate in sito con software dedicato (ThermaCAM Reporter 7 Pro)⁶⁵



Figura 9.3 – Quadro d'unione delle lesioni⁶⁵

9.2 Analisi dinamica-strutturale con rilievo delle frequenze di vibrazione

Nel febbraio 2011, quando sono state condotte le misure, Piazza Roma e Corso Accademia erano accessibili senza limitazioni di transito dai veicoli sia pubblici, sia privati. La pavimentazione era realizzata in conglomerato bituminoso con l'interposizione di lastre in granito in corrispondenza dell'ingresso principale del palazzo: il cambio di materiale generava una forte discontinuità nella superficie stradale che creava un forte battimento, specialmente al passaggio dei mezzi pesanti (figura 9.4).⁶⁵

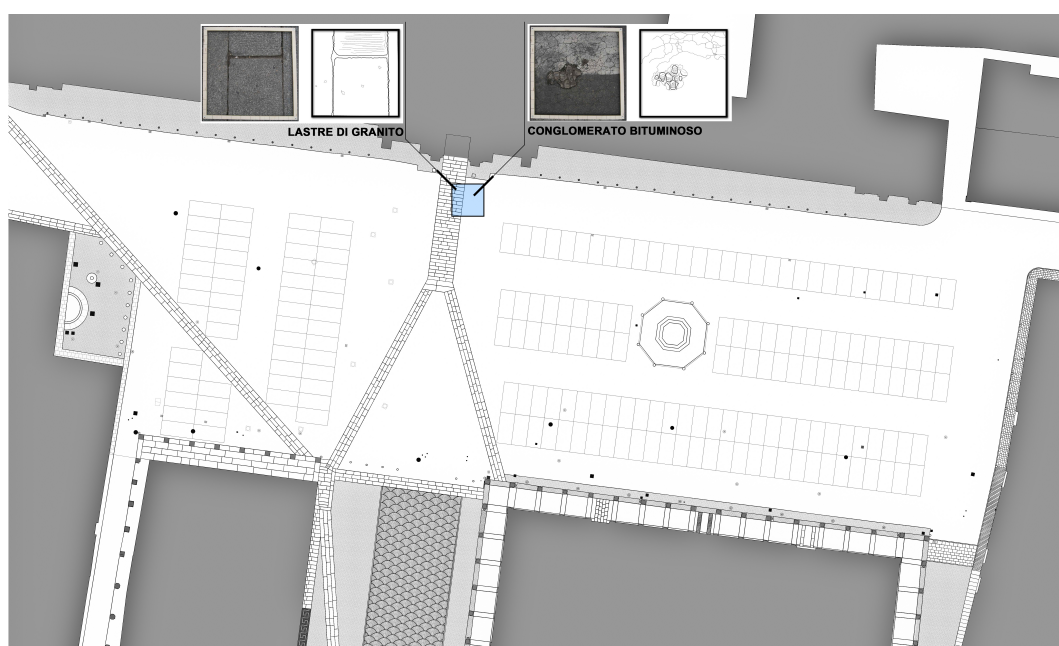


Figura 9.4 – Pianta di Piazza Roma nel 2011: viene posto in evidenza la discontinuità di materiale lungo la carreggiata in corrispondenza dell'ingresso principale del palazzo

Il rilievo delle frequenze è stato effettuato attraverso 2 differenti tipi di misurazione, una in continuo per una durata di 150 minuti e una a campione durante il transito di un autobus e di un filobus in sequenza diretta. Sono stati posti sulla sezione di misura (figura 9.5) 5 accelerometri in corrispondenza del bordo stradale, del solaio del Salone d'Onore posto al primo piano del palazzo, del ballatoio e dell'intradosso e del rinfiacco della centina (figura 9.6).

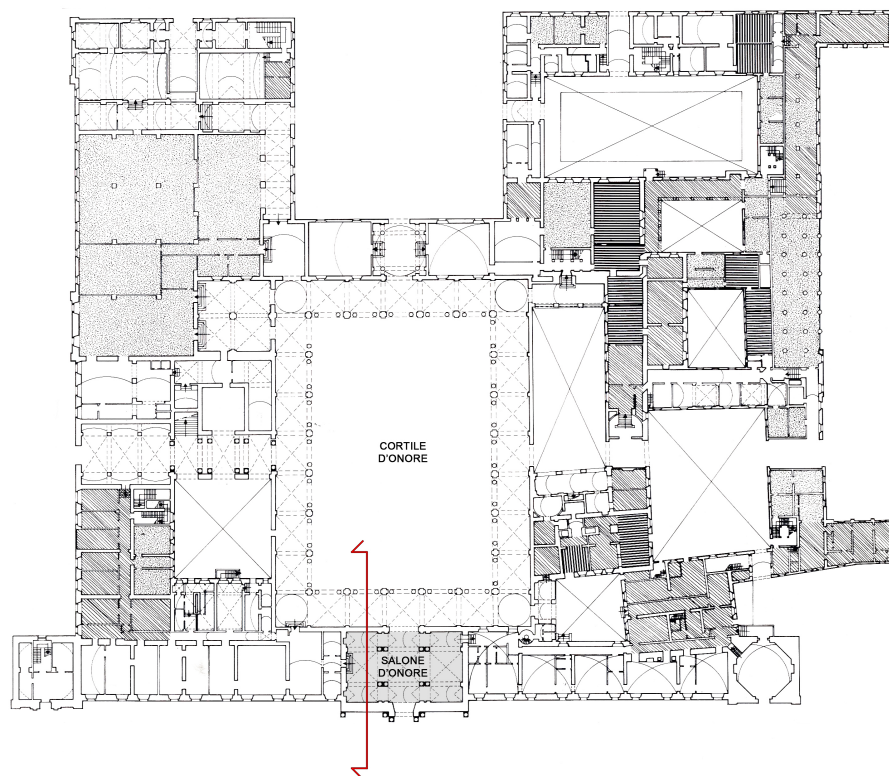


Figura 9.5 – Pianta del piano terra dell'Accademia militare con indicazione della sezione sulla quale sono stati posizionati gli accelerometri

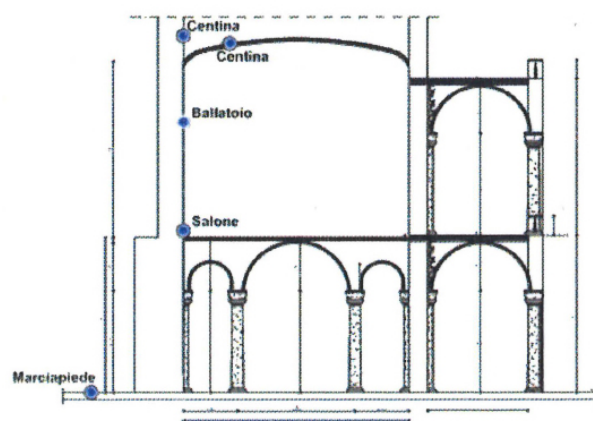


Figura 9.6 – Posizione degli accelerometri⁶⁵

Gli accelerometri misurano in millivolts la perturbazione indotta al sensore: moltiplicando tale dato per il fattore caratteristico di taratura (l'accelerazione di gravità pari a $9,81 \text{ mm/s}^2$) si ottiene la misura di accelerazione richiesta in mm/s^2 . Per valutare, invece, le frequenze proprie di vibrazione è necessario decomporre la serie originaria dei dati di accelerazione in una somma di funzioni periodiche di diversa frequenza attraverso l'analisi di Fourier⁶⁵: in questo modo è possibile scomporre una vibrazione periodica complessa in moti o vibrazioni più semplici basati sugli andamenti di funzioni seno e coseno. Il teorema di Fourier afferma infatti che

«Qualunque segnale periodico può essere scomposto nella somma di un eventuale termine costante e di segni sinusoidali, dei quali il primo, avente lo stesso periodo e quindi la stessa frequenza del segnale considerato, si chiama prima armonica o fondamentale, e gli altri, aventi periodi sottomultipli e quindi frequenze multiple, si chiamano armoniche superiori» (figura 9.7)

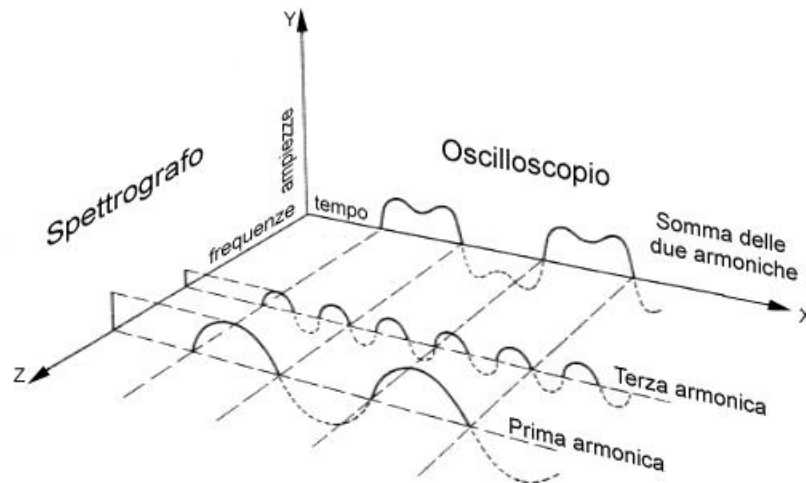


Figura 9.7 – Lo spettrografo nella figura in basso misura le ampiezze delle armoniche. L'oscilloscopio, invece, mostra la forma d'onda nel dominio del tempo, ottenuta dalla somma delle prime due armoniche della serie

9.2.1 Risultati delle misure effettuate in continuo (150 minuti)

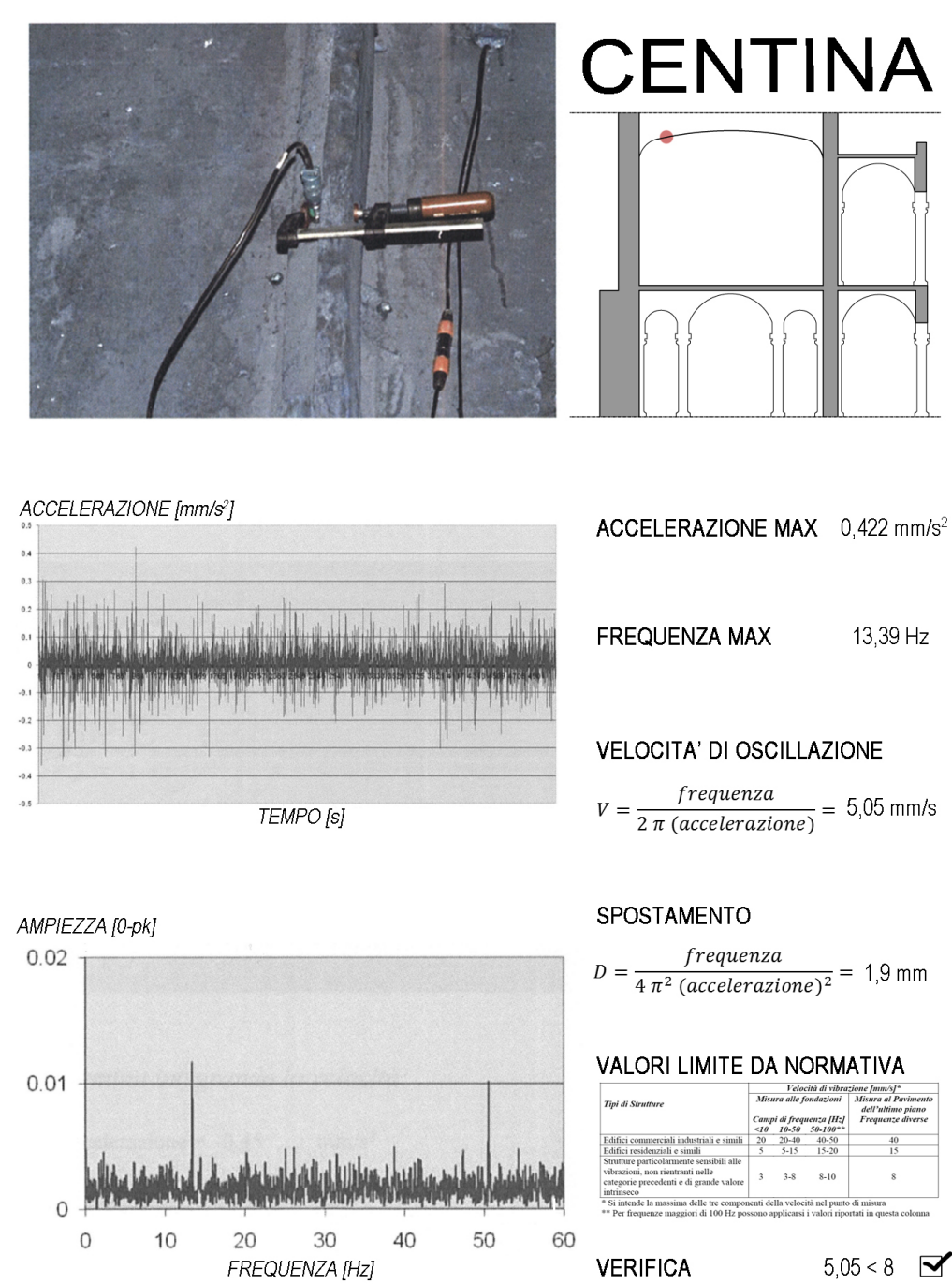
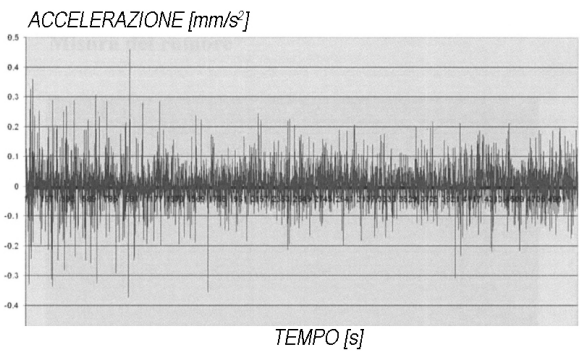
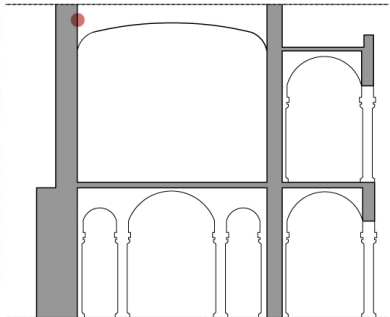


Figura 9.8 – Scheda di monitoraggio 1: sensore posto sulla centina⁶⁵



SOTTOTETTO

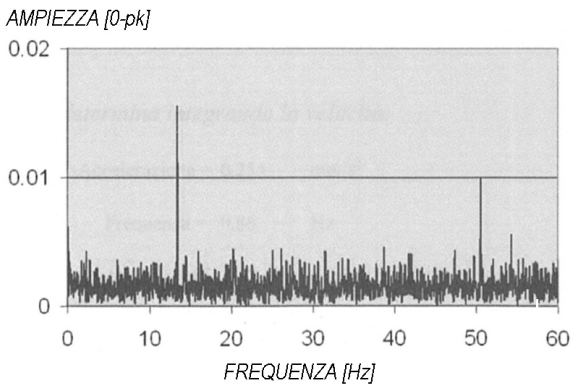


ACCELERAZIONE MAX -0,45 mm/s²

FREQUENZA MAX 13,40 Hz

VELOCITA' DI OSCILLAZIONE

$$V = \frac{\text{frequenza}}{2 \pi (\text{accelerazione})} = -4,74 \text{ mm/s}$$



SPOSTAMENTO

A_i

$$D = \frac{\text{frequenza}}{4 \pi^2 (\text{accelerazione})^2} = 1,67 \text{ mm}$$

VALORI LIMITE DA NORMATIVA

Tipi di Strutture	Velocità di vibrazione [mm/s] [*]		
	Misura alle fondazioni		Misura al Pavimento dell'ultimo piano
	Campi di frequenza [Hz]		Frequenze diverse
Edifici commerciali industriali e simili	20	20-40	40-50
Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20
Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3-8	8-10

^{*} Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura

^{**} Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna

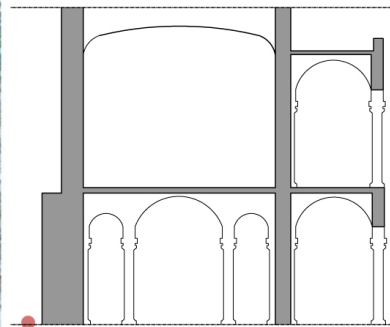
VERIFICA

4,74 < 8 ✓

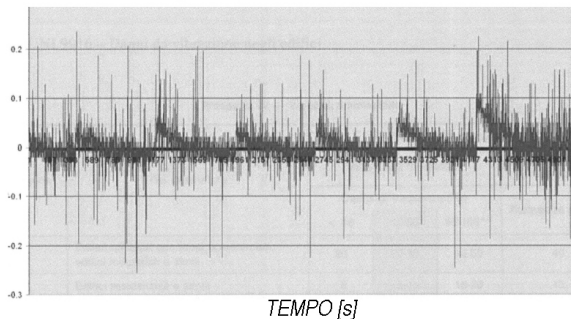
Figura 9.9 – Scheda di monitoraggio 2: sensore posto in corrispondenza del sottotetto⁶⁵



MARCIAPIEDE



ACCELERAZIONE [mm/s²]



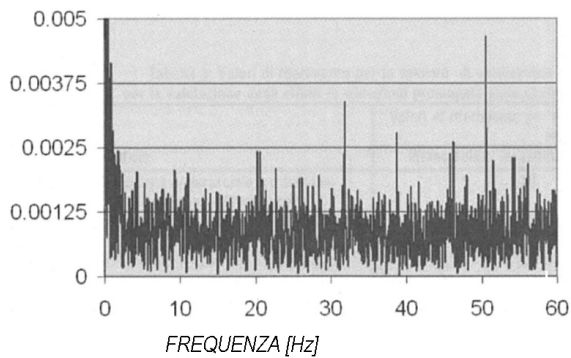
ACCELERAZIONE MAX + 0,255 mm/s²

FREQUENZA MAX 0,86 Hz

VELOCITA' DI OSCILLAZIONE

$$V = \frac{\text{frequenza}}{2 \pi (\text{accelerazione})} = + 0,54 \text{ mm/s}$$

AMPIEZZA [0-pk]



SPOSTAMENTO

$$D = \frac{\text{frequenza}}{4 \pi^2 (\text{accelerazione})^2} = 0,34 \text{ mm}$$

VALORI LIMITE DA NORMATIVA

Tipi di Strutture	Velocità di vibrazione [mm/s] ^{**}		
	Misura alle fondazioni	Misura al Pavimento dell'ultimo piano	Frequenze diverse
Campi di frequenza [Hz]	<10	10-50	50-100**
Edifici commerciali industriali e simili	20	20-40	40-50
Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20
Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore artistico	3	3-8	8-10

^{*} Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura
^{**} Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna

VERIFICA

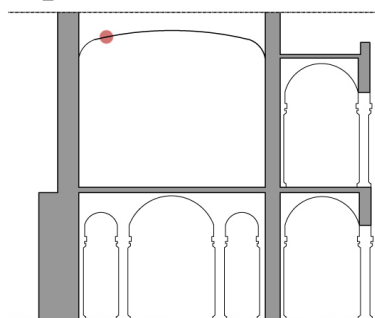
0,54 < 3 ☒

Figura 9.10 – Scheda di monitoraggio 3: sensore posto sul marciapiede⁶⁵

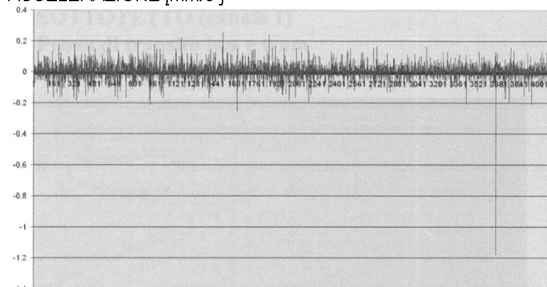
9.2.2 Risultati delle misure effettuate in sequenza (passaggio di autobus e filobus)



CENTINA



ACCELERAZIONE [mm/s²]



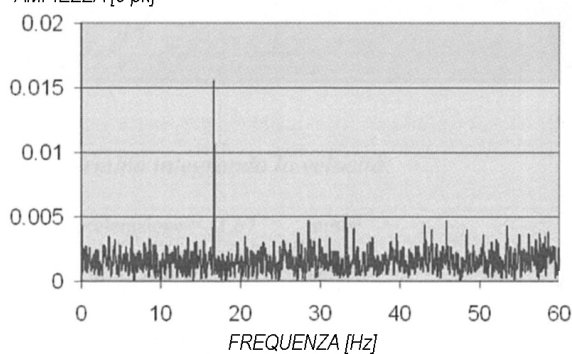
ACCELERAZIONE MAX - 1,18 mm/s²

FREQUENZA MAX 16,65 Hz

VELOCITA' DI OSCILLAZIONE

$$V = \frac{\text{frequenza}}{2 \pi (\text{accelerazione})} = - 2,25 \text{ mm/s}$$

AMPIEZZA [0-pk]



SPOSTAMENTO

$$D = \frac{\text{frequenza}}{4 \pi^2 (\text{accelerazione})^2} = 0,30 \text{ mm}$$

VALORI LIMITE DA NORMATIVA

Tipi di Strutture	Velocità di vibrazione [mm/s] ^{**}	
	Misura alle fondazioni Campi di frequenza [Hz]	Misura al Pavimento dell'ultimo piano Frequenze diverse
Edifici commerciali industriali e simili	20-40	40-50
Edifici residenziali e simili	5-15	15-20
Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore artistico	3-8	8-10

^{**} Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura

^{**} Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna

VERIFICA

2,25 < 8 ☒

Figura 9.11 – Scheda di monitoraggio 4: sensore posto sulla centina⁶⁵



Figura 9.12 – Scheda di monitoraggio 5: sensore posto in corrispondenza del sottotetto⁶⁵

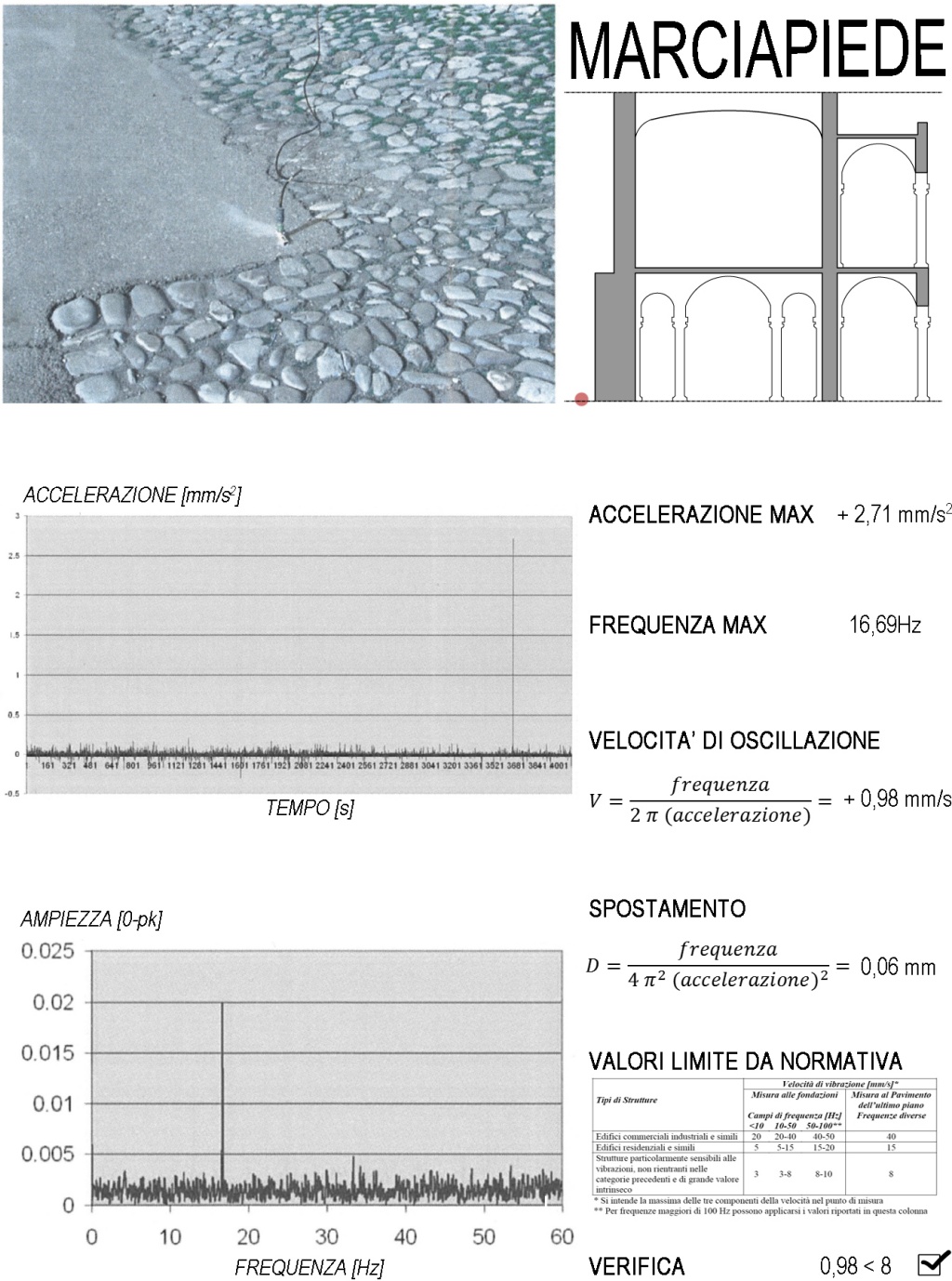


Figura 9.13 – Scheda di monitoraggio 6: sensore posto sul marciapiede⁶⁵

9.2.3 Analisi dei risultati

Nel grafico riassuntivo in figura 9.14 vengono sovrapposti gli andamenti delle accelerazioni misurate in sequenza nel caso del sensore sulla centina e di quello sul marciapiede: i due picchi rappresentano rispettivamente il passaggio dell'autobus e del filobus. Il grafico mostra che il moto vibratorio della volta è indotto proprio dal traffico stradale poiché i picchi di accelerazione della centina e del marciapiede sono quasi simultanei. Si può osservare anche il rimbalzo di assestamento della centina in coda alla sequenza di passaggio dei veicoli.⁶⁵

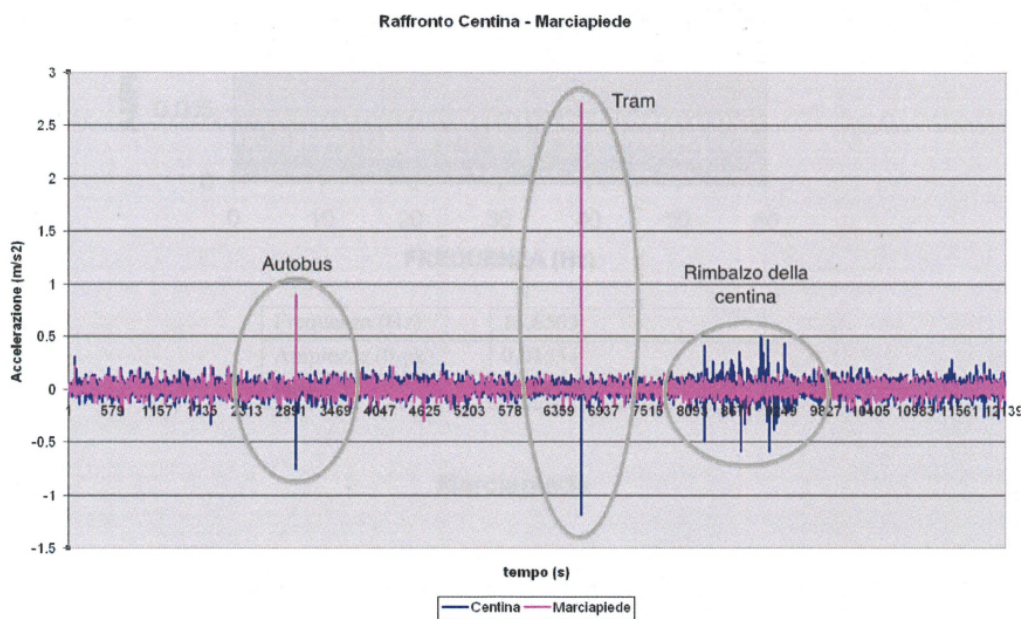


Figura 9.14 – Confronto fra il grafico di accelerazione della centina e del marciapiede nel caso delle misure condotte in sequenza⁶⁵

Lo studio sperimentale condotto nel 2011 mette, quindi, in evidenza l'insorgere delle vibrazioni a causa del passaggio dei veicoli pesanti sulla discontinuità della pavimentazione stradale all'interfaccia conglomerato bituminoso/lastre di granito. La frequenza misurata, pari a 16,65 Hz, transita coerentemente in fase fino alla centina della volta, provocando i distacchi e le lesioni rilevati con l'analisi termografica.⁶⁵

Le velocità di oscillazione ricavate risultano sempre inferiori ai valori limite riportati nella norma UNI 9916, ma sono comunque sufficienti a creare un movimento vibratorio che causa martellamento e microlesioni degli intonaci.⁶⁵

10 L'INTERVENTO DI ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO PROPOSTO PER PIAZZA ROMA

Il progetto di pedonalizzazione di Piazza Roma attualmente in esecuzione prevede il mantenimento della strada carrabile dedicata al trasporto pubblico a una distanza di circa 4 m dal fronte dell'Accademia militare (figura 10.1).

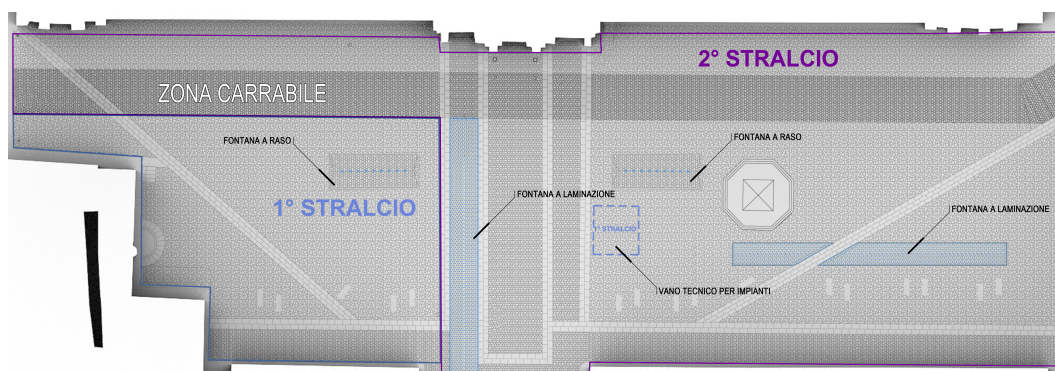


Figura 10.1 – Zona carrabile per il transito dei mezzi pubblici

In accordo con SETA, la società che gestisce il trasporto pubblico, è stato modificato il percorso della linea 4 sul retro del palazzo in modo da eliminare la quota di vibrazioni dovute al transito degli autobus a metano. Il percorso dei filobus appartenenti alla linea 11, invece, rimarrà invariato per sfruttare la rete elettrica di alimentazione recentemente ristrutturata (figura 10.2).⁶⁶

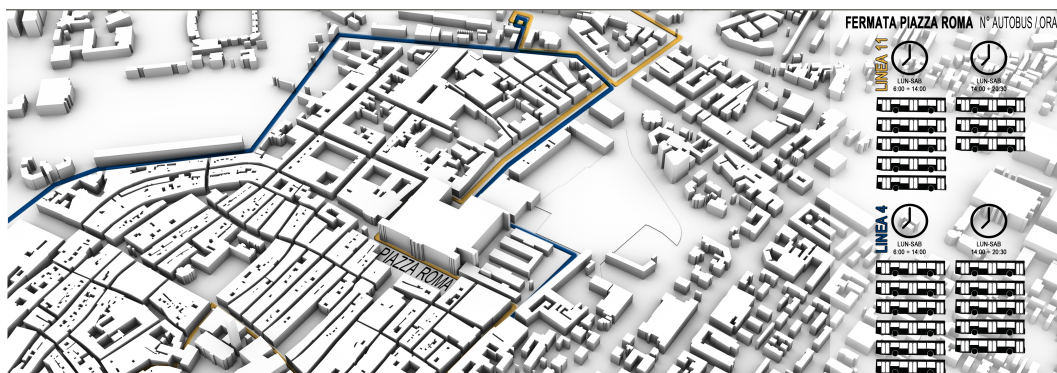


Figura 10.2 – Percorsi e frequenze delle linee di trasporto pubblico che transitano vicino all'Accademia militare di Modena

Gli interventi di attenuazione delle vibrazioni da traffico compatibili con la nuova pavimentazione ad elementi lapidei di Piazza Roma possono essere:

- l'inserimento di elementi di schermatura fra la sede stradale e il palazzo;
- l'interposizione di cuscinetti di neoprene all'interno dello strato di base;
- l'inserimento di un materassino smorzante nello strato di fondazione.

La scelta fra questi tipi di soluzioni tecnologiche dipende da diversi fattori, in particolar modo dalla stratigrafia del terreno e dalla presenza di reti impiantistiche sotterranee (figura 10.3).

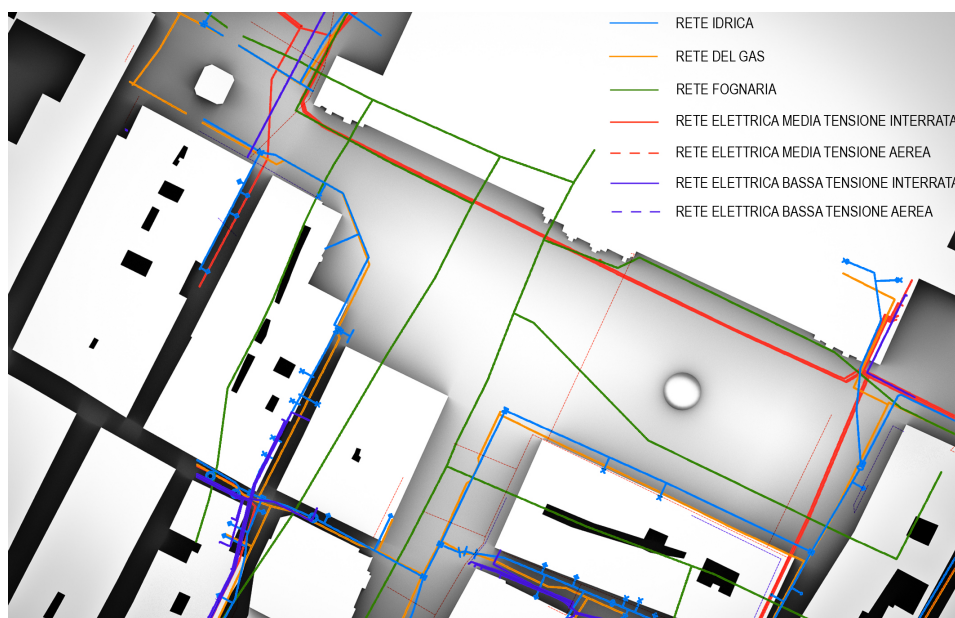


Figura 10.3 – Reti impiantistiche presenti in Piazza Roma

L'INTERVENTO DI ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO PROPOSTO PER PIAZZA ROMA

L'inserimento di elementi di barriera contro la propagazione delle vibrazioni non è consigliabile in quanto il materiale di cui è costituito il terreno fino a 8 metri al di sotto del piano di calpestio è di scarsa consistenza (figure 10.4, 10.5). Inoltre lo spazio fra la sede stradale e il fronte dell'edificio sarebbe inadeguato per le operazioni di posa in opera di una trincea.

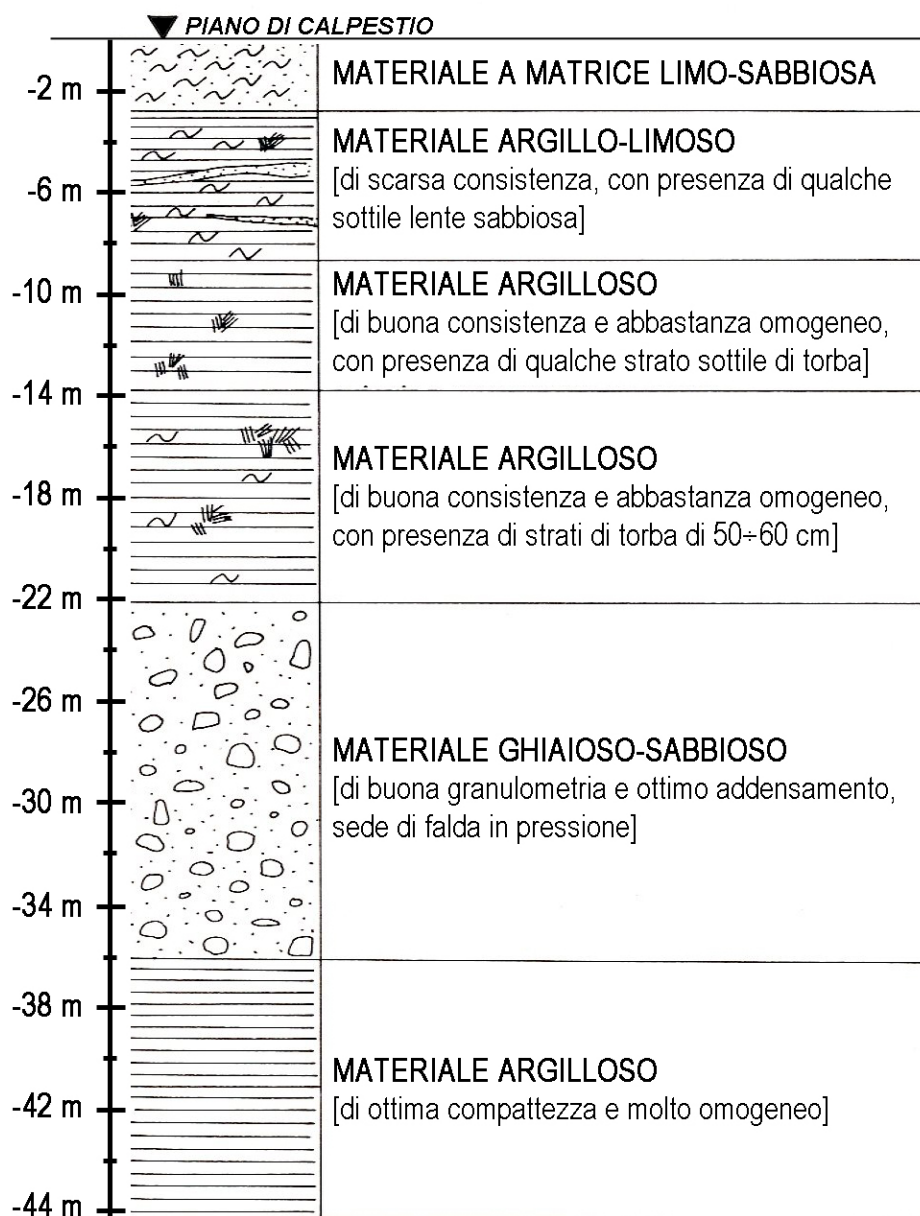


Figura 10.4 – Stratigrafia geotecnica del terreno direttamente interessato dal Palazzo Ducale rilevata durante lo studio dei fenomeni di subsidenza in Piazza Roma condotto da Croci G. nel corso degli anni '80³⁵



Figura 10.5 – Saggio condotto durante il cantiere in Piazza Roma il 3 giugno 2014 fino alla profondità di 4 m al di sotto del piano di calpestio

L'interposizione di cuscinetti di neoprene nello strato di base prevede anche l'utilizzo di elementi come piastre prefabbricate, travi in calcestruzzo armato pre-compresso e solette in c.c.a. e si configura, quindi, come un intervento dai costi elevati.

L'inserimento di un materassino elastomerico dalle proprietà anti-vibranti risulta quindi la soluzione meno invasiva, di più facile posa in opera ed economicamente più vantaggiosa fra quelle presentate.

10.1 Il progetto della pavimentazione stradale

E' stato scelto un tipo di pacchetto stradale semirigido con strato di base in misto cementato per garantire una graduale ed uniforme distribuzione dei carichi prodotti dai veicoli pesanti. Il materassino smorzante è stato inserito nella fondazione fra lo strato in misto cementato e quello in stabilizzato granulometrico (figura 10.6). La resistenza e la durata della pavimentazione dipenderanno, oltre che da una corretta progettazione, anche da un'attenta posa in opera.⁶⁷

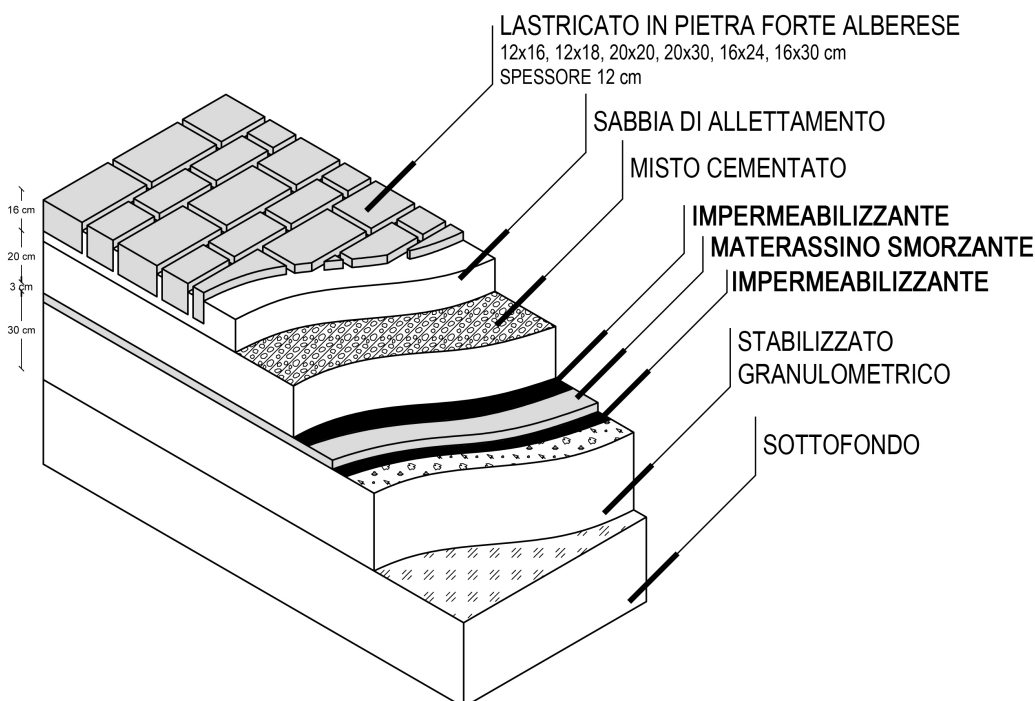


Figura 10.6 – Pacchetto stradale di progetto

Un migliore effetto di barriera contro la propagazione delle onde superficiali si ottiene disponendo lo strato antivibrante non solo orizzontalmente ma anche lateralmente, con risvolti lungo il fianco del pacchetto stradale. La durabilità e la funzionalità del materasso smorzante dipendono dalla sua perfetta impermeabilizzazione in modo che eventuali infiltrazioni di acqua non causino il deperimento del materiale: a questo scopo vengono stesi due strati di fogli di polipropilene impermeabilizzanti a protezione della superficie superiore e inferiore del materassino. Per favorire il deflusso delle acque meteoriche ed evitare l'accumulo di condensa al di sopra dello strato impermeabilizzante, il pacchetto stradale di progetto prevede una pendenza trasversale del 2,5%, superiore a quella del 2% prevista in origine per l'intervento in assenza di materassino antivibrante. La raccolta delle acque provenienti

dal dilavamento superficiale avviene tramite caditoie disposte in appositi elementi in calcestruzzo (cunette alla francese). Si propone, inoltre, l'utilizzo di una malta con additivo polimerico anti-infiltrazione in corrispondenza dei giunti fra gli elementi lapidei (figura 10.7).

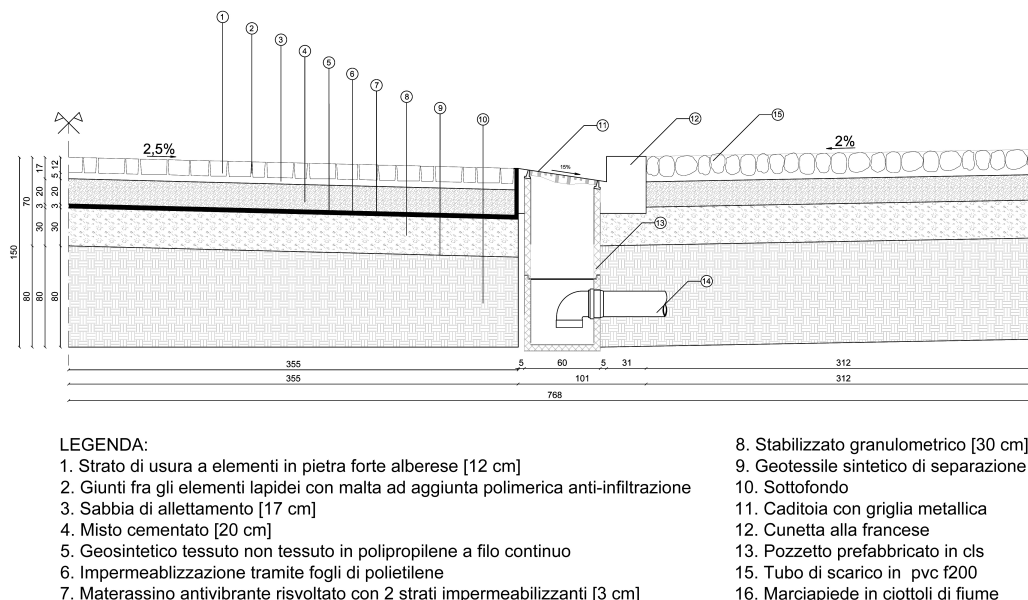


Figura 10.7 – Sezione trasversale del pacchetto di progetto

10.1.1 Strato d'usura

Lo strato di usura è costituito da una pavimentazione a elementi lapidei in pietra forte alberese. Le facce superiori delle pietre sono lavorate a mano mediante fiammatura e successiva serigrafia. Si riportano in seguito le specifiche tecniche della tipologia di lastricato scelto, che devono in ogni caso soddisfare i requisiti riportati nella norma UNI EN 1341-2003 *Lastre in pietra naturale per pavimentazioni esterne (requisiti e metodi di prova)*:

resistenza a compressione ≥ 152 MPa;
 resistenza a compressione dopo cicli di gelività ≥ 141 MPa;
 resistenza a flessione $\geq 18,2$ MPa;
 resistenza a flessione dopo cicli di gelività ≥ 19 MPa;
 resistenza ad abrasione ≤ 22 mm;
 assorbimento idrico $\leq 1\%$.

Gli elementi in pietra alberese sono posati su uno strato di allettamento composto da sabbia e cemento al 3% in modo da ridurre l'asportazione durante il deflusso dell'acqua o durante le operazioni di pulizia del piano stradale, evitando il distacco degli elementi lapidei (figure 10.8, 10.9). Dopo aver steso un primo strato di sabbia di allettamento, è consigliabile procedere a compattazione del materiale con piastra vibrante, spargendo successivamente un nuovo strato di circa 1,5 cm di spessore: con questo metodo si controlla maggiormente il cedimento finale della pavimentazione.⁶⁷



Figura 10.8 – Posa in opera del lastricato in pietra forte alberese, visita in cantiere del 19/05/2014



Figura 10.9 – Posa in opera del lastricato in pietra forte alberese, visita in cantiere del 19/05/2014

Ogni lastra deve essere battuta fino al raggiungimento della quota di progetto e successivamente bagnata alla fine di ogni giornata di posa. I giunti sono realizzati con malta cementizia ad alte prestazioni modificata con l'inserimento di additivo polimerico liquido per la diminuzione dell'assorbimento d'acqua. L'additivo può essere una dispersione acquosa di polimeri sintetici da miscelare direttamente ai prodotti a base di cemento in quantità pari al 25÷30%. La malta modificata così ottenuta, oltre a contrastare l'infiltrazione, ha una miglior compattezza e una maggior resistenza all'abrasione di una malta semplice e può essere utilizzata anche per giunti di pavimentazioni soggette a traffico intenso.

10.1.2 Strato di base

Lo strato di base ha la funzione di sopportare senza deformazioni permanenti le sollecitazioni trasmesse dai veicoli. Inoltre deve resistere ai fenomeni di fatica e ad eventuali assestamenti del sottofondo. Una pavimentazione stradale semirigida con misto cementato, infatti, si adatta anche a zone poco uniformi del sottofondo. Gli strati in misto cementato sono costituiti da un misto granulare di ghiaia o pietrisco di frantumazione e sabbia impastati con acqua e cemento Portland (tra il 2,5÷3,5% in peso degli inerti asciutti). La perdita in peso¹ degli aggregati misurata con Prova Los Angeles deve essere < 30%. La granulometria degli inerti è riportata in figura 10.10:

¹ Indica la resistenza degli inerti all'abrasione e all'urto.

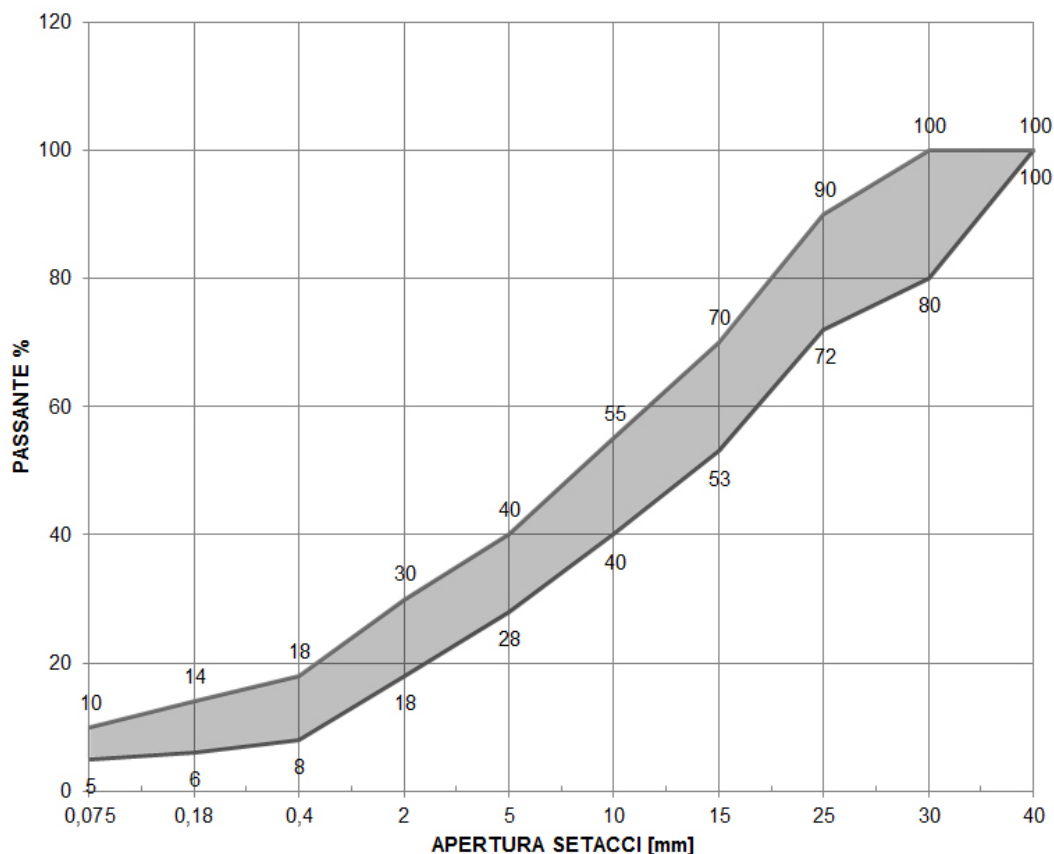


Figura 10.10 – Fusso della composizione granulometrica del misto cementato⁶³

10.1.3 Strato di fondazione

10.1.3.1 Il materassino antivibrante

La scelta del tipo di materassino antivibrante viene condotta in base all'ordine di grandezza del carico che si presume interesserà la sovrastruttura dopo l'apertura al traffico. Nel tratto in cui si prevede di inserire il materassino smorzante la circolazione è consentita soltanto ai filobus della linea 11. Per calcolare l'ordine di grandezza della sollecitazione sulla pavimentazione si considera che il carico massimo previsto dal *Progetto di percorribilità delle strade del centro storico* per Piazza Roma è di 22 tonnellate (v. paragrafo 3.1). La distribuzione dei carichi per asse per un filobus a 3 assi può essere ipotizzata pari al 30% sull'asse anteriore e al 35% sul secondo e terzo asse: ipotizzando un'area di impronta dello pneumatico del 10% della circonferenza della ruota (tipologia utilizzata sui filobus: 275/70 R22,5) il carico di ogni ruota induce una pressione sulla pavimentazione inferiore a

0,2 N/mm². Vengono, quindi, esclusi dalla scelta i materassini ad alte prestazioni adatti a situazioni di carico più elevate (figura 10.11).

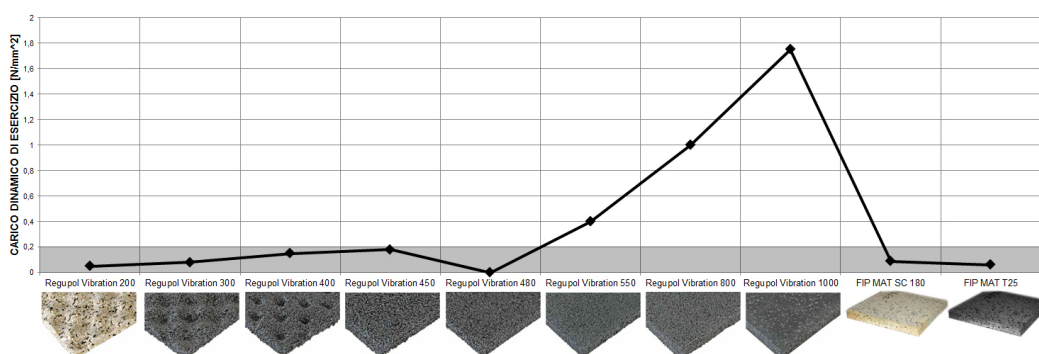


Figura 10.11 – Confronto fra diverse tipologie di materassino in base al carico di esercizio

Le tipologie rimanenti hanno prestazioni simili: il prodotto con il miglior rapporto prestazioni-prezzo è il materassino FIP MAT SC 180 (figura 10.12).

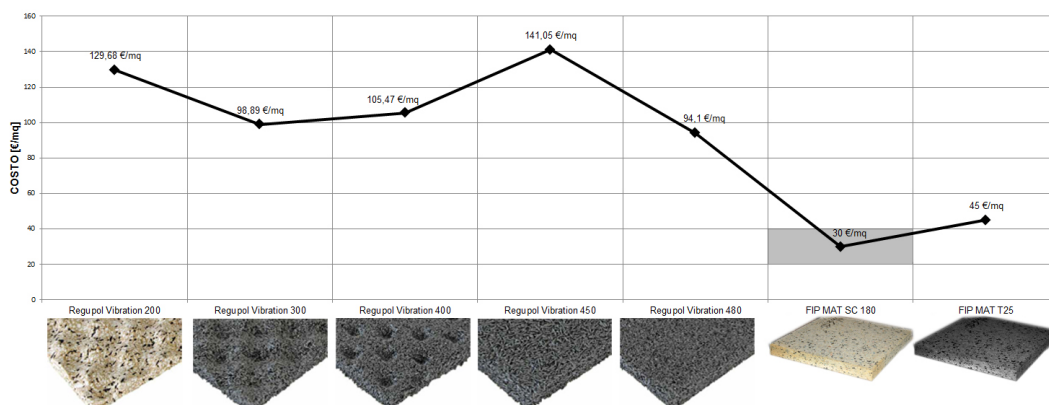


Figura 10.12 – Confronto di costo fra diverse tipologie di materassino

Le specifiche tecniche dei materassini antivibranti sono state normalizzate nel 1997 in modo da poter aiutare i progettisti nella scelta dei prodotti, permettendo l'analisi di costi/prestazioni attraverso il confronto di parametri tecnici comparabili. La determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materassini per l'isolamento dalle vibrazioni avviene tramite la normativa UNI 10570 *Prodotti per l'isolamento delle vibrazioni – Determinazione delle caratteristiche meccaniche di materassini e piastre*: essa definisce le modalità di prova per la caratterizzazione meccanica in campo statico e dinamico e la valutazione dell'invecchiamento meccanico del cam-

pione. La normativa si applica a tutti i prodotti elastomerici sotto forma di piastre² o di materassini³.

I prodotti vengono classificati in base a:

→ RIGIDEZZA (modulo alla Winkler):

– materassini duri $\text{se } k_s \geq 0,05 \frac{N}{mm^3};$

– materassini morbidi $\text{se } k_s < 0,05 \frac{N}{mm^3};$

→ FATTORE DI SMORZAMENTO:

– materassini vibro-assorbenti $\text{se } f_d \geq 20\%;$

– materassini vibro-isolanti $\text{se } f_d < 20\%.$

In condizioni di esercizio il materassino antivibrante è soggetto sia a carichi statici sia ad azioni di natura dinamica e ciclica: le prove di caratterizzazione del materiale risultano quindi di tipo quasi-statico e di tipo dinamico (figura 10.13).



Figura 10.13 – Campione del materassino FIP MAT SC 180⁶⁸

Le prove quasi-statiche servono a determinare il comportamento del materiale a fronte di carichi applicati in modo lento in una sequenza di tre cicli di carico-scarico, ciascuno della durata di 1 minuto (figura 10.14). I primi due cicli servono per assestare il campione e l'ultimo ciclo fornisce i valori dei parametri statici ricercati. Considerando un pre-carico inferiore al 5% del carico massimo, la tensione applicata attraverso il carico di prova è data dalla somma della tensione di precarico (σ_0) e di carico (σ_s):

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_s;$$

²Prodotti discreti, di geometria assegnata, con eventuali fori e asole passanti.

³Prodotti continui, forniti generalmente in grandi lastre o in rotoli e prezzati al m².

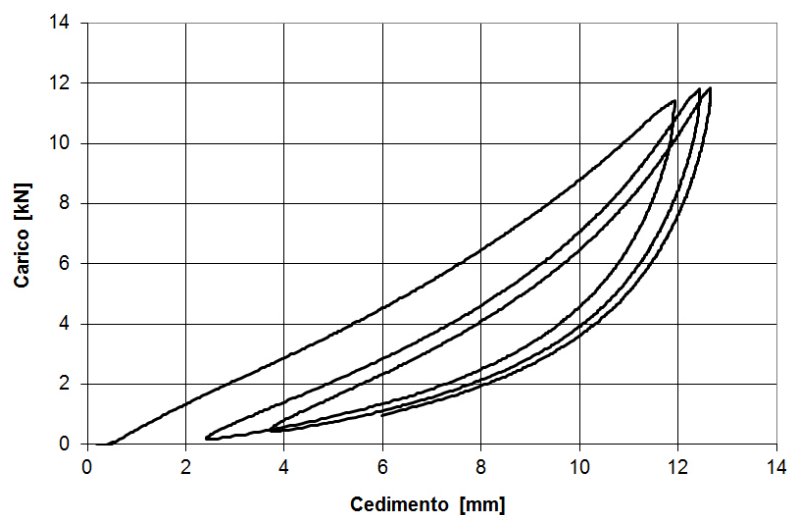


Figura 10.14 – Prova di carico quasi-statico in base alla normativa UNI 10570: cicli di carico-scarico

La curva carico-cedimento relativa al materassino FIP MAT SC 180 è riportata in figura 10.15:

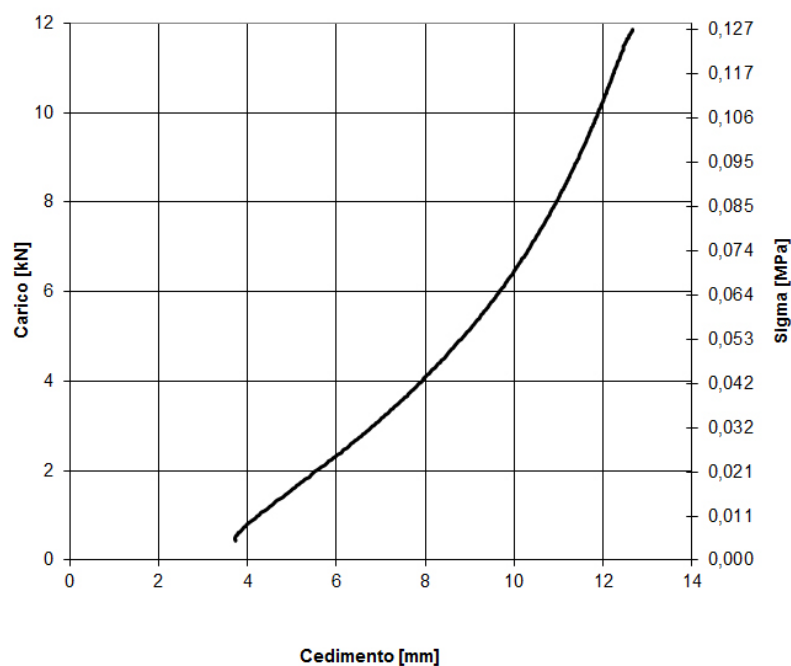


Figura 10.15 – Prova di carico quasi-statico in base alla normativa UNI 10570: curva carico-cedimento

La rigidezza quasi-statica (k_s) viene determinata dal rapporto fra la tensione di carico e la differenza fra il cedimento da carico (δ_s) e quello da precarico (δ_0) valutati nel terzo ciclo di carico:

$$k_s = \frac{\sigma_s}{\delta_s - \delta_0} = 0,0121 \frac{N}{mm^3} < 0,05 \frac{N}{mm^3} \quad \text{MATERASSINO MORBIDO}$$

La prova dinamica di oscillazione libera⁴ consente di valutare le caratteristiche meccaniche dei materassini con riferimento alla presenza di carichi dinamici. La prova prevede il posizionamento di una massa liberamente oscillante in seguito all'applicazione di un carico impulsivo. Attraverso la disposizione di due accelerometri sull'estradosso della massa è possibile determinare la rigidezza dinamica (k_d) e il fattore di smorzamento dinamico (f_d) (figure 10.16, 10.17, 10.18):

$$k_d \leq 0,03 \frac{N}{mm^3};$$

$$f_d < 20\%$$

MATERASSINO VIBRO-ISOLANTE

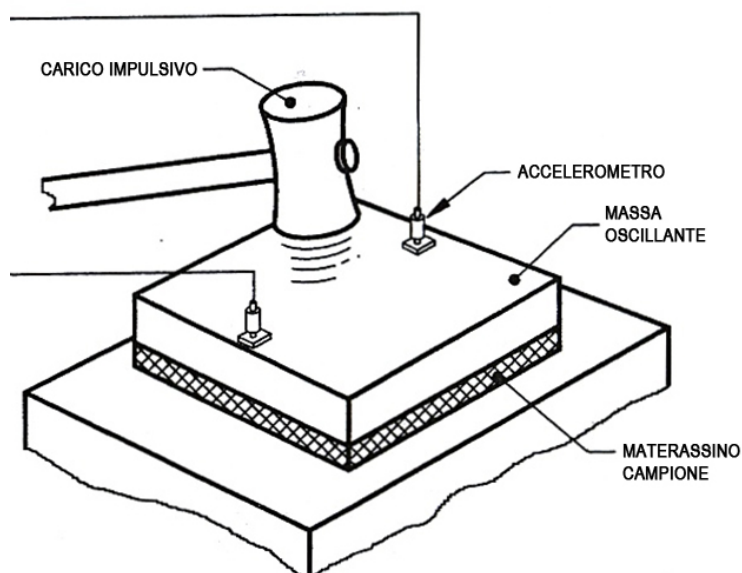


Figura 10.16 – Prova di carico dinamico in base alla normativa UNI 10570: modalità di prova di oscillazione libera

⁴Accanto alla prova di oscillazione libera la normativa UNI 10570 specifica la prova dinamica forzata, più accurata ma più lunga e di maggiore complessità realizzativa. Per tale ragione è stata elaborata la prova di oscillazione libera come procedura semplificata che consente di ottenere i parametri sul comportamento dinamico del campione in tempi più brevi. E' possibile utilizzare la prova dinamica di oscillazione libera per il controllo del campione, mentre nella fase di qualifica del prodotto è necessario che la ditta utilizzi la prova dinamica forzata.

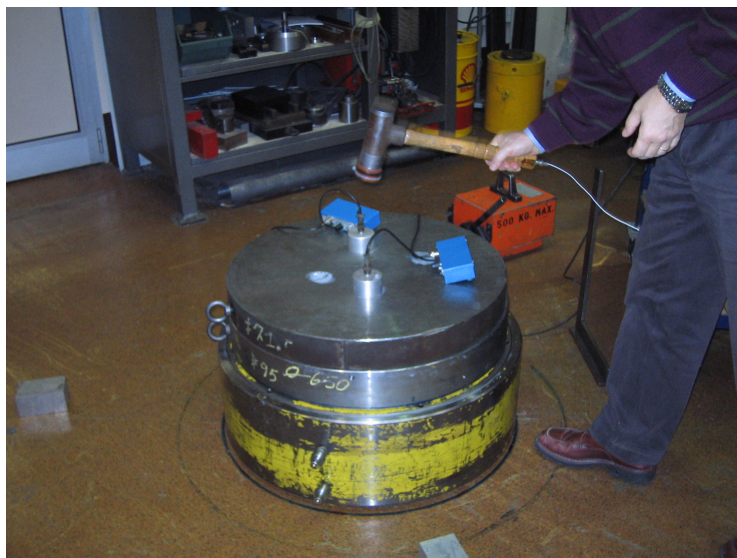


Figura 10.17 – Realizzazione della prova di oscillazione libera sul campione FIP MAT SC 180⁶⁸



Figura 10.18 – Realizzazione della prova di oscillazione libera sul campione FIP MAT SC 180⁶⁸

Per determinare la capacità del materassino antivibrante di conservare le sue caratteristiche fisico-meccaniche in presenza di azioni applicate per un periodo prolungato di tempo, la norma UNI 10570 propone anche due prove di invecchiamento: la prova di deformazione permanente e la prova a fatica.

10.1.3.2 Lo stabilizzato granulometrico

Il misto granulare stabilizzato per lo strato di fondazione è ottenuto dalla selezione di ghiaie alluvionali di natura prevalentemente calcarea e da pietrisco di varia granulometria. La percentuale di elementi di frantumazione è in genere variabile fra 0÷40%. Lo stabilizzato granulometrico è costituito da elementi in prevalenza arrotondati di dimensione massima pari a 40 mm e non deve contenere elementi con forma appiattita, allungata o lenticolare. Il rapporto fra passante al setaccio 0,075 e il passante al setaccio 0,4 deve essere inferiore a 2/3 (figura 10.19). La perdita in peso dello stabilizzato granulometrico misurata con Prova Los Angeles deve essere < 30%.

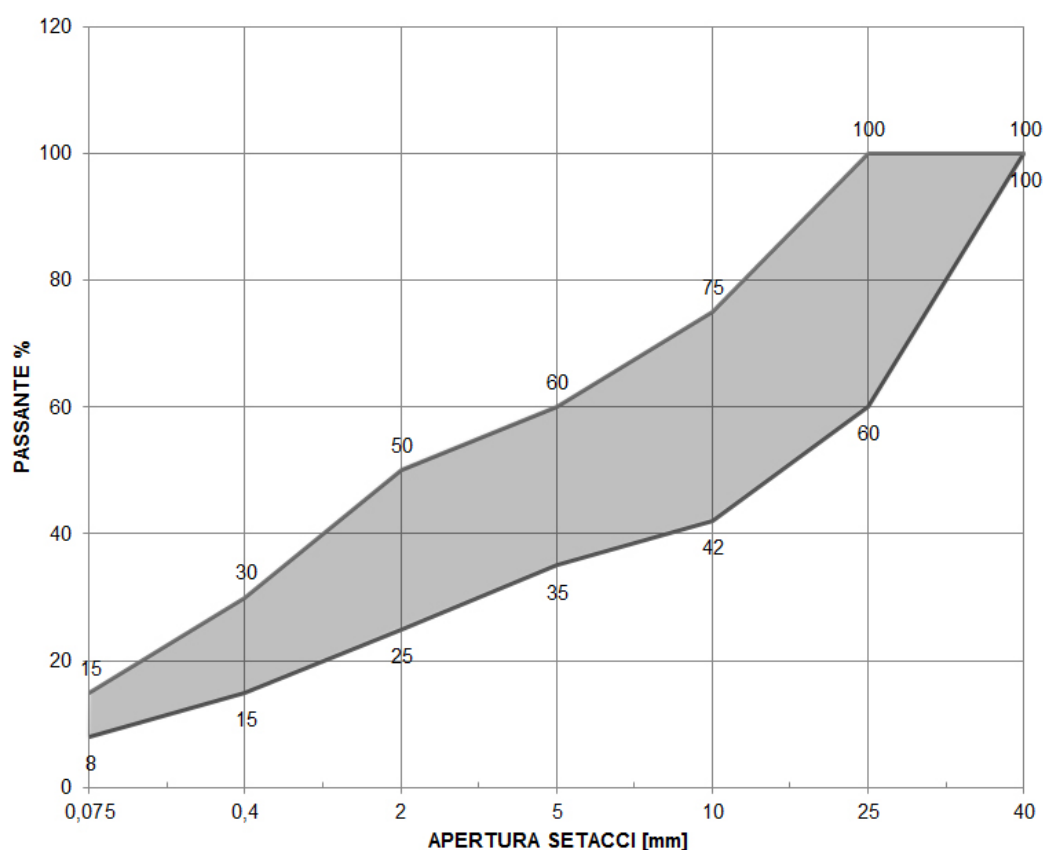


Figura 10.19 – Fuso della composizione granulometrica del misto granulare

Per evitare la penetrazione di materiale dello strato di stabilizzato granulometrico nel sottofondo o la trasmigrazione di particelle fini dal sottofondo al misto granulare, si applica un geosintetico di separazione in poliestere fra i due strati a diversa granulometria (figure 10.20, 10.21).

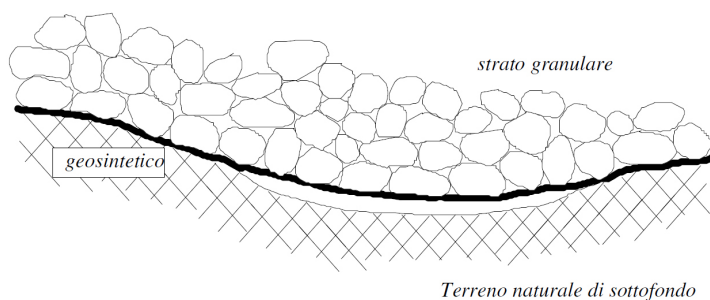


Figura 10.20 – Disposizione del geosintetico di separazione fra lo strato granulare e il terreno di sottofondo



GEOTEX R

TABELLA RIEPILOGATIVA

DESCRIZIONE: Geotessile nontessuto agugliato (GTX-N)
COMPOSIZIONE: Poliestere bianco

CARATTERISTICHE FISICHE

Massa areica	400 g/mq	EN ISO 9864
Spessore a 2 kPa	2,00 mm	EN ISO 9863

CARATTERISTICHE MECCANICHE

Resistenza a trazione longitudinale MD	7,0 kN/m	EN ISO 10319
Resistenza a trazione trasversale CMD	7,0 kN/m	EN ISO 10319
Allungamento a carico max longitudinale MD	70 %	EN ISO 10319
Allungamento a carico max trasversale CMD	70 %	EN ISO 10319
Resistenza al punzonamento statico CBR	1,2 kN	EN ISO 12236
Perforazione al cone drop test	20 mm	EN ISO 13433

CARATTERISTICHE IDRAULICHE

Apertura caratteristica O_{90}	70 μ m	EN ISO 12956
Permeabilità normale al piano $V_{i,50}$	46 l/s*mq	EN ISO 11058

Figura 10.21 – Caratteristiche tecniche di un geosintetico non tessuto in poliestere per la separazione di stabilizzato granulometrico e terreno di sottofondo

10.2 I dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali

Data la vicinanza della sede stradale a una delle due fontane a laminazione, si ritiene necessario proteggere alcune zone del tracciato attraverso dispositivi di ritenuta o separatori di traffico: si vuole, infatti, assicurare che l'eventuale svio di un veicolo non comporti situazioni di pericolo o danni agli edifici e ai manufatti impiantistici. Secondo quanto indicato dal D.M. 25/08/2004 *Criteri di progettazione, installazione, verifica e manutenzione dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali*, le

zone del tracciato da proteggere sono i manufatti che in caso di fuoriuscita o urto dei veicoli potrebbero subire danni, comportando pericolo anche per i non utenti della strada.⁶⁹

Secondo quanto riportato nel decreto ministeriale, la scelta dei dispositivi di sicurezza passiva deve avvenire tenendo conto:

- della loro ubicazione (spartitraffico, di bordo);
- del tipo e delle caratteristiche geometriche della strada lungo la quale saranno posti in opera;
- del volume e della composizione di traffico in seguito all'apertura della strada.

Si prendono in esame diversi dispositivi di sicurezza, tenendo in conto le necessità estetiche presenti in un'area di progetto di particolare pregio architettonico come quella di Piazza Roma.

10.2.1 Le barriere di sicurezza

Le barriere di sicurezza vengono classificate in base al comportamento in seguito all'urto (deformabili, semirigide e rigide) oppure in base al materiale di costruzione (acciaio, calcestruzzo, miste acciaio-clc, legno). Le barriere in acciaio o in legno sono composte da:

- montanti: rappresentano il sostegno verticale per gli altri componenti della barriera, ma sono soggetti alle maggiori deformazioni e dissipazioni di energia;
- elementi orizzontali: a più correnti per barriere in legno o a nastro per barriere in acciaio (in questo caso la resistenza è garantita attraverso un comportamento a membrana che si deforma con una configurazione a catenaria)⁶⁹;
- corrente inferiore: elemento orizzontale finalizzato al mantenimento della direzione del veicolo collidente attraverso il redirectionamento delle ruote in seguito all'urto.

Le barriere in calcestruzzo sono invalicabili anche per i mezzi pesanti, ma inducono angoli di ritorno del veicolo dopo l'urto che possono aumentare la pericolosità dell'evento.⁶⁹ Esse sono costituite da:

- elementi prefabbricati in clc collegati fra loro attraverso piatti bullonati;
- un tirante longitudinale montato in corrispondenza della sommità degli elementi prefabbricati, in modo da rendere continua la struttura.

E' di particolare importanza il sistema di ancoraggio delle barriere: nel caso di elementi infissi è determinante la lunghezza di infissione dei montanti, valutata in relazione alla composizione del terreno di sottofondo; nel caso di barriere non infisse, l'ancoraggio avviene in corrispondenza del cordolo.⁶⁹

In base alla capacità di contenimento, le barriere di sicurezza vengono classificate in:

CLASSE	CAPACITA' DI CONTENIMENTO
N1	Minima
N2	Media
H1	Normale
H2	Elevata
H3	Elevatissima
H4	Per tratti ad alto rischio

Tabella 10.1 – Classificazione delle barriere di sicurezza in funzione della capacità di contenimento

Per strade urbane di quartiere e strade locali è possibile utilizzare barriere con capacità di contenimento da minima a normale (classi N1, N2, H1) (figura 10.22).

TIPO DI STRADA	TIPO DI TRAFFICO	DESTINAZIONE BARRIERE			
		Barriere spartitraffico	Barriere bordo laterale	Barriere bordo ponte ⁽¹⁾	Attenuatori
Autostrade (A) e strade extraurbane principali (B)	I II III	H2 H3 H3-H4 ⁽²⁾	H1 H2 H2-H3 ⁽²⁾	H2 H3 H3-H4 ⁽²⁾	TC1 o TC2 secondo velocità ≤ oppure > di 80 km/h
Strade extraurbane secondarie (C) e strade urbane di scorrimento	I II III	H1 H2 H2	N2 H1 H2	H2 H2 H3	
Strade urbane di quartiere (E) e strade locali (F)	I II III	N2 H1 H1	N1 N2 H1	H2 H2 H2	

⁽¹⁾ Per ponti o viadotti si intendono opere di luce superiore a 10 metri; per luci minori sono equiparate al bordo laterale.

⁽²⁾ La scelta tra le due classi sarà determinata dal progettista.

Figura 10.22 – Classi minime delle barriere da impiegare secondo il D.M. 25/08/2004⁶⁹

La barriere di sicurezza sono, tuttavia, una soluzione esteticamente molto impattante e non sono adatte per il progetto di riqualificazione di Piazza Roma, anche se dal punto di vista della sicurezza offrono le prestazioni migliori (figura 10.23).



Figura 10.23 – Impatto estetico di barriere di sicurezza in legno con rinforzi in acciaio nel contesto di Piazza Roma (sezione longitudinale in corrispondenza dell'asse stradale)

10.2.2 I separatori di traffico

Nel caso in esame un possibile intervento meno anti-estetico delle barriere di sicurezza potrebbero essere separatori di traffico come dissuasori di sosta puntuali con carattere di continuità (figura 10.24) o elementi di arredo continui ad effetto schermante con inserimento di elementi vegetali (figura 10.25). I separatori di traffico devono garantire la distinzione dei percorsi pedonali da quelli carrabili in condizioni di sicurezza e possono essere realizzati in materiale lapideo, calcestruzzo pigmentato o con strutture metalliche in relazione alle caratteristiche del contesto. Risulta necessario evitare che questi elementi siano solo appoggiati sulla superficie ed è quindi opportuno studiare un sistema efficiente di ancoraggio a terra.

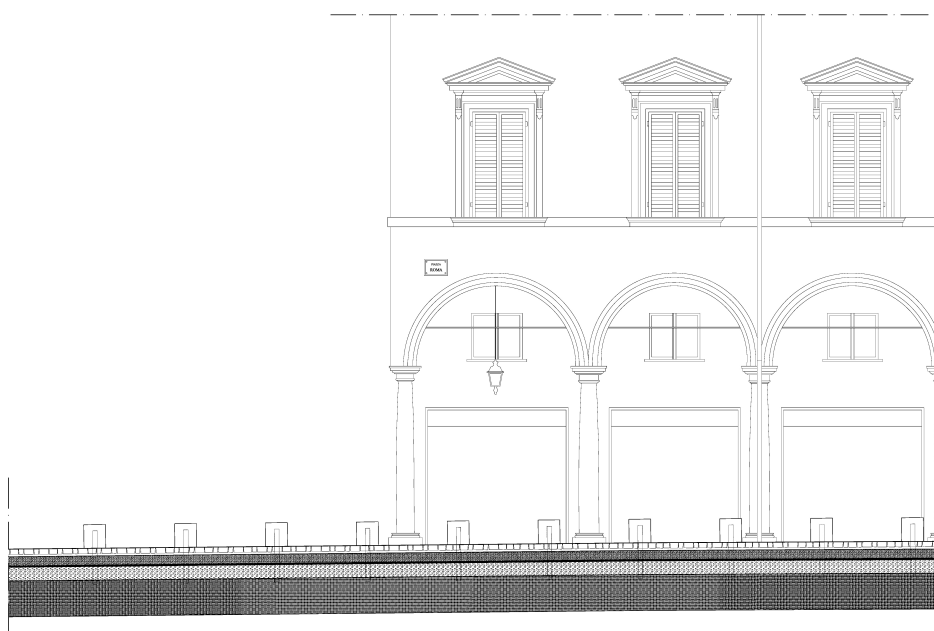


Figura 10.24 – Dissuasori di sosta puntuali con carattere di continuità infissi a terra

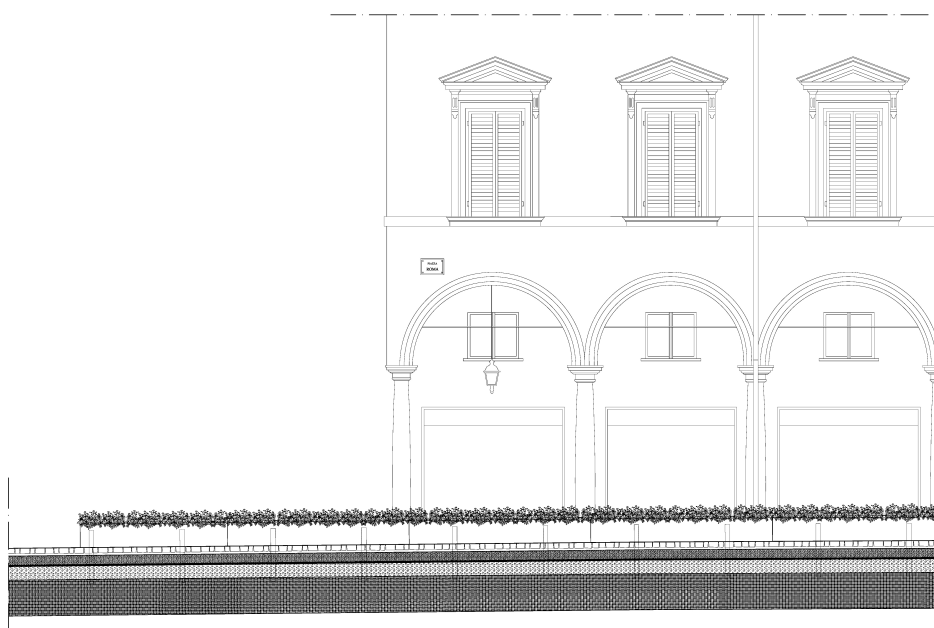


Figura 10.25 – Fioriere continue infisse a terra

L'ulteriore accorgimento necessario a favore di sicurezza per evitare situazioni di pericolo è aumentare la distanza fra la sede stradale e la fontana a laminazione: si prevede quindi di allineare la fontana a laminazione con quella trasversale a raso, realizzando una rampa per raccordare le pendenze. In questo modo si aumenterebbe la distanza della carreggiata dal manufatto impiantistico di 4,80 m (figura 10.26).

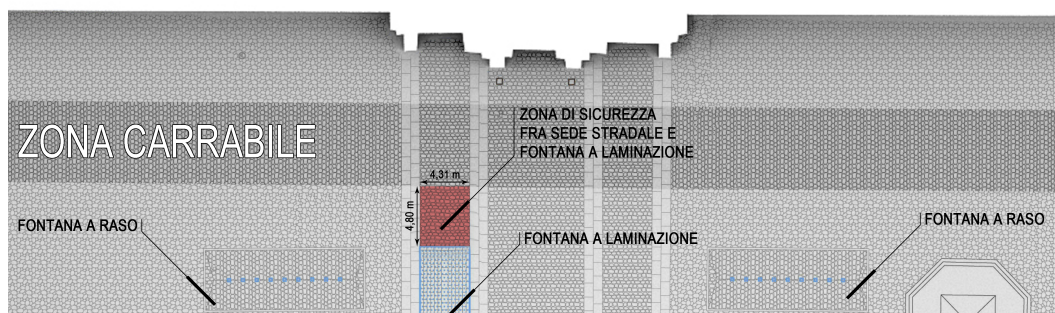


Figura 10.26 – Zona di sicurezza fra sede stradale e fontana a laminazione

CONCLUSIONI

A conclusione della progettazione del nuovo pacchetto stradale per la zona carrabile di Piazza Roma si propongono alcune valutazioni economiche sulla fattibilità dell'intervento.

Di seguito si riporta il computo metrico estimativo del pacchetto stradale proposto in questa tesi con schema indicativo del tratto di strada soggetto ad intervento (figura 1): i prezzi unitari sono stati ricavati dall'Elenco Prezzi 2012 del Compartimento della Viabilità per l'Emilia Romagna, dall'Elenco Prezzi 2014 di Veneto Strade e dall'Elenco Prezzi 2014 del Comune di Modena per il progetto di Piazza Roma. Il prezzo del materassino smorzante e del suo impermeabilizzante sono stati desunti dal Capitolato Speciale d'Appalto del progetto di rifacimento della sovrastruttura stradale nel centro storico di Demonte per la mitigazione delle vibrazioni da traffico.

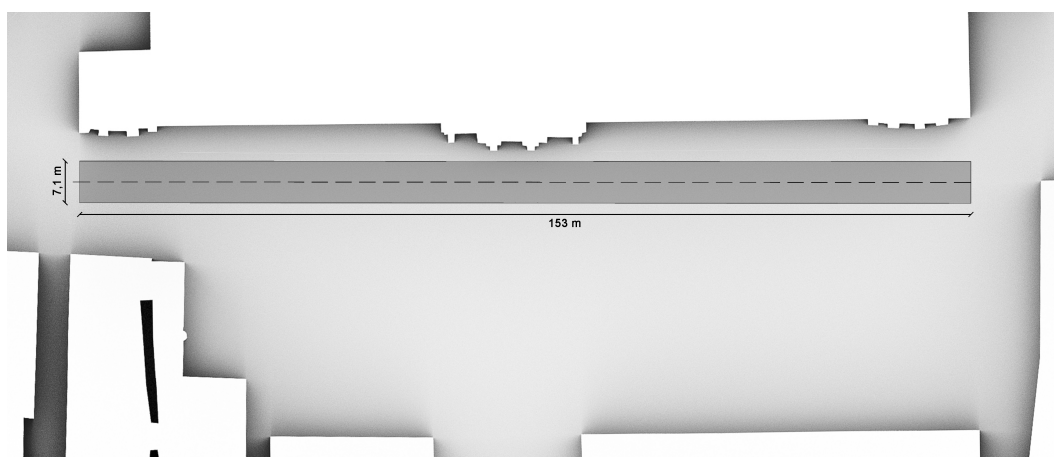


Figura 10.27 – Schema indicativo del tratto di strada soggetto ad intervento

N°	FONTE ELENCO PREZZI UNITARI	CODICI E.P.	DESCRIZIONE	u.m.	QUANTITÀ				PREZZO UNITARIO	IMPORTI		IMPORTO LAVORI
					Parti simili	Misure				PARZIALI	TOTALI	
			Lungh.	Largh.		Alt.	Totale					
1	ANAS - Emilia Romagna	A.03.004.b	DEMOLIZIONE DI SOVRASTRUTTURA STRADALE CON REIMPIEGO DEI MATERIALI comprese le pavimentazioni, con gli oneri e le prescrizioni indicate nelle Norme Tecniche, compreso l'onere del lavoro in presenza di traffico, la frantumazione del materiale demolito per poterlo adoperare per altri usi stradali, quali le fondazioni e sottofondazioni, l'accatastamento del materiale in luoghi di deposito fissati dall'Amministrazione, la frantumazione del materiale e la sua miscelazione con altro materiale	m³	1	153	9,10	0,70	€ 6,45	974,61	€ 6.286,23	DEMOLIZIONI
2	ANAS - Emilia Romagna	D.01.001	FONDAZIONE STRADALE IN MISTO GRANULARE STABILIZZATO con granulometria continua, compresa la fornitura del materiale, l'eventuale aggiunta di acqua, la compattazione con idonei rulli vibranti di idoneo peso, il tutto secondo le prescrizioni del CSA. E' compresa la posa in opera, ogni fornitura ed onere per ottenere un lavoro a perfetta regola d'arte misurato in opera dopo il costipamento	m³	1	153	7,10	0,30	€ 30,44	325,89	€ 9.920,09	
3	ANAS - Emilia Romagna	E.01.030.a	FORNITURA E STESA DI TELI DI GEOTESSILE CON FUNZIONE DI SEPARAZIONE E FILTRAZIONE fornitura e stesa (compresi ogni onere e spese) di geotessile a marchiatura CE costituito al 100% di fibre di prima scelta resistenti all'invecchiamento da UV e immarcescibili, a struttura isotropa (non tessuti) o anisotropa (trama e ordito) con funzione di separazione, filtrazione dei piani di posa dei rilevati o in opere di terra, (escluso l'utilizzo nella realizzazione di manufatti in terra rinforzata e muri verdi), mediante l'inserimento alla base o in strati intermedi di geotessili, nella direzione di sforzo prevalente	m²	2	153	7,1		€ 1,78	1086,3	€ 1.933,61	€ 3.867,23
4	Capitolato Speciale d'Appalto - Demonte (CN) - 2005		FORNITURA E POSA IN OPERA DI MATERASSO SMORZANTE in aggregato di poliuretano, dello spessore di 30 mm, con densità pari a 180 kg/mc e avente le caratteristiche indicate negli elaborati di progetto	m²	1	153	7,9		€ 30,00	1208,7	€ 36.261,00	INTERVENTO DI MITIGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA TRAFFICO
5	Capitolato Speciale d'Appalto - Demonte (CN) - 2005		STRATO ANTICONTAMINANTE IN POLIPROPILENE O POLIESTERE in telo non tessuto avente le caratteristiche indicate negli elaborati di progetto	m²	1	153	7,9		€ 4,00	1208,7	€ 4.834,80	

6	ANAS - Emilia Romagna	D.01.003		FONDAZIONE STRADALE IN MISTO CEMENTATO da stendere con vibrofornice, con spessori compresi fra 20 e 30 cm, costituito da una miscela (inerti, acqua e cemento) realizzata secondo il CSA, compreso l'onere del successivo spandimento sulla superficie dello strato di una mano di emulsione bituminosa in ragione di 1-2 kg/mq, compresa la fornitura dei materiali, lavorazione e costipamento dello strato con idonee attrezzature e ogni altro onere per dare il lavoro compiuto secondo le modalità prescritte, misurato in opera dopo il costipamento	m ³	1	153	7,10	0,20	217,26	€ 47,33	€ 10.282,92	€ 10.282,92	STRATO DI BASE
7	Elenco Prezzi Unitari per l'intervento in Piazza Roma - Comune di Modena - 2014	165		FORNITURA E POSA IN OPERA DI BLOCCHI DI PIETRA FORTE ALBERESE dim. 12x16; 12x18; 20x20; 20x30; 16x24; 16x30 cm; spessore 12 cm, posati in sottovallo opportunamente costipati mediante piastra vibrante e saturati con polvere di frantoio con successiva bagnatura e battitura con piastra vibrante (su richiesta della D.L. potrà essere eseguita stuccatura con malta cementizia additivata con polimeri anti-infiltrazione). Il peso specifico dovrà essere min. 2500 kg/mc e la tensione di rottura a flessione unitaria almeno di 18 MPa. Coefficiente di imbibizione 0,32-0,38% e resistenza a compressione min. di 145 MPa	m ²	1	153	7,10		1086,30	€ 138,00	€ 149.909,40		
8	Elenco Prezzi Unitari per l'intervento in Piazza Roma - Comune di Modena - 2014	189		SOLO POSA IN OPERA DI LASTRONI DI GRANITO forniti dall'Amministrazione Comunale, spessore min. 20 cm, larghezza 50-80 cm a corriere da 1,5 m ed oltre, compresi il carico in magazzino comunale, la posa in letto di cls su misto cementato e relativa stuccatura	m ²	4	1,2	9,10		10,92	€ 88,00	€ 960,96	€ 3.843,84	
9	Elenco Prezzi Unitari per l'intervento in Piazza Roma - Comune di Modena - 2014	124		COSTRUZIONE DI CANALIZZAZIONE PER CAVI M.T., B.T., I.P., S.I.P., compreso lo scavo in terreno di qualsiasi natura e consistenza fino alla profondità di 1,80 m e, in genere, ogni onere necessario a eseguire il lavoro a regola d'arte	m	1	153			150,00	€ 36,00	€ 5.400,00	€ 153.753,24	PAVIMENTAZIONI
10	Elenco Prezzi Unitari Veneto Strade 2014	14_VS.010.09.b		CUNETTA TIPO ALLA FRANCESE fornitura e posa in opera di cunetta alla francese in conglomerato cementizio classe di resistenza min. 35 Mpa, avente le caratteristiche e dimensioni previste dagli elaborati di progetto. Nel prezzo è compreso ogni onere per l'esecuzione dei lavori a regola d'arte.	m	2	153				€ 31,31	€ 4.790,43	€ 9.580,86	
11	Elenco Prezzi Unitari per l'intervento in Piazza Roma - Comune di Modena - 2014	80		FORNITURA E POSA IN OPERA DI CADITOIE lineari ispezionabili per la captazione delle acque meteoriche pulibili per la manutenzione e costituite da canali di drenaggio. Sono compresi prezzi speciali quali elementi di chiusura, raccordi di uscita laterali e/o verticali e quant'altro per rendere l'opera perfettamente eseguita secondo le istruzioni della D.L. e realizzata come da elaborati grafici di progetto.	m	2	153				€ 168,00	€ 25.704,00	€ 51.408,00	IMPIANTI DI SCOLO DELLE ACQUE
													€ 66.388,86	
													€ 291.594,37	TOTALE

La demolizione e la nuova costruzione del percorso stradale a fianco del fronte dell'Accademia militare sono contenute nel secondo stralcio del progetto di riqualificazione di Piazza Roma. Il computo metrico estimativo relativo a questa fase di cantiere prevede un importo totale dei lavori pari a 1.600.000 €, compresi l'iva, gli oneri di sicurezza, l'assicurazione del progettista e le varie utenze (figura 2).

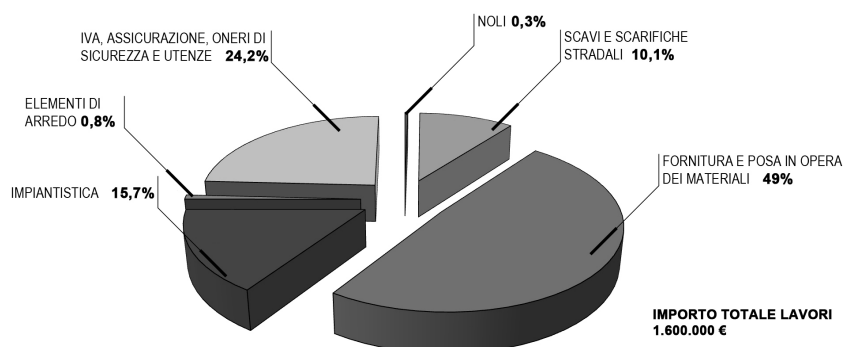


Figura 10.28 – Importo delle diverse tipologie di lavorazioni in base al computo metrico estimativo del secondo stralcio del progetto di riqualificazione di Piazza Roma

Il pacchetto stradale proposto in questa tesi per attenuare il fenomeno delle vibrazioni da traffico attraverso l'inserimento di un materassino antivibrante prevede un aumento dell'importo totale dei lavori dell'ordine di grandezza del 3%. La maggiorazione dovuta alla fornitura e alla posa in opera del materassino antivibrante FIP MAT SC 180, dell'impermeabilizzante e degli accorgimenti previsti per la separazione degli strati a diversa granulometria attraverso l'uso di geosintetici non tessuti è stata calcolata attraverso il computo metrico estimativo (al netto dell'iva e degli oneri di sicurezza) pari a 44.963 € e quindi valutabile sull'ordine di grandezza di 45.000 € (figura 3).

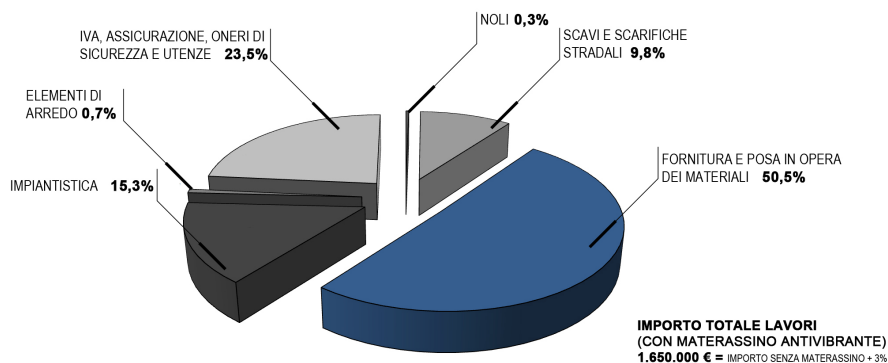


Figura 10.29 – Importo delle diverse tipologie di lavorazioni con inserimento di materassino antivibrante e relative tecnologie realizzative

L'inserimento di un materassino smorzante per l'attenuazione delle vibrazioni indotte da traffico stradale si configura, quindi, come un intervento di efficacia comprovata in letteratura, poco invasivo e con un buon rapporto prestazioni/costi. Le soluzioni tecnologiche aggiuntive di impermeabilizzazione del materiale elastomerico e di smaltimento delle acque permettono di evitare l'invecchiamento o il decadimento precoce del materiale a seguito di infiltrazioni d'acqua, preservandone l'efficacia per la durata della vita utile dell'opera.

APPENDICE

Il cantiere in Piazza Roma

A. Progetto esecutivo: 1° STRALCIO

SEZIONE PRIMA IDENTIFICAZIONE E DESCRIZIONE DELL'OPERA

ANAGRAFICA DEL CANTIERE

Nome progetto	Recupero e riqualificazione di Piazza Roma 1° stralcio		
Indirizzo	Piazza Roma		
Località			
Comune	Modena	Provincia	MO
Natura dei lavori	OG 3 (Lavori stradali) OS10-OS12A		
Importo dei lavori (euro)	€ 370.189,00		
Entità dei lavori in uomini-giorno	$370.189,00 * 0,25 / (8 * 30) = 386$		
Inizio lavori	Dalla data di consegna dei lavori		
Fine lavori	-		
Durata dei lavori gg	240		
Numero massimo lavoratori in cantiere (previsto)	8		
Numero di imprese e lavoratori autonomi (previsto)	5		

Figura 10.30 – Organizzazione del cantiere

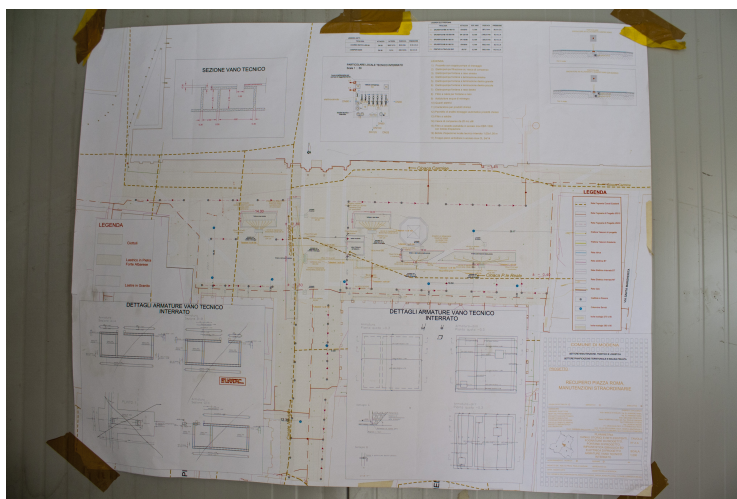


Figura 10.31 – Visita in cantiere del 08/05/2014

A.1. Rimozione delle pavimentazioni esistenti in materiale lapideo



Figura 10.32 – Visita in cantiere del 08/05/2014



Figura 10.33 – Visita in cantiere del 08/05/2014

A.2. Rilievo degli scavi archeologici



Figura 10.34 – Visita in cantiere del 08/05/2014



Figura 10.35 – Visita in cantiere del 08/05/2014

A.3. Realizzazione del vano tecnico per l'impianto delle fontane



Figura 10.36 – Visita in cantiere del 08/05/2014



Figura 10.37 – Visita in cantiere del 19/05/2014



Figura 10.38 – Visita in cantiere del 20/05/2014



Figura 10.39 – Visita in cantiere del 20/05/2014



Figura 10.40 – Visita in cantiere del 03/06/2014



Figura 10.41 – Visita in cantiere del 03/06/2014

A.4. Posa delle pavimentazioni in materiale lapideo



Figura 10.42 – Visita in cantiere del 07/07/2014



Figura 10.43 – Visita in cantiere del 07/07/2014



Figura 10.44 – Visita in cantiere del 07/07/2014



Figura 10.45 – Visita in cantiere del 08/07/2014

DEFINIZIONI

buche	avvallamenti localizzati, con profondità inferiore a 5 cm, soggetti alla perdita degli aggregati per effetto degli agenti atmosferici e del traffico
cedimenti	depressioni del piano viabile con profondità massima pari a 8÷10 cm ed eventuale compresenza di fessurazioni e distacco di materiale
coefficiente di carico dinamico	rapporto fra la deviazione standard della variazione del carico dell'asse del veicolo (dovuta a velocità, sistema di sospensioni e irregolarità della superficie stradale) e valor medio del carico dell'asse del veicolo
coefficiente di Poisson	coefficiente di contrazione trasversale pari al rapporto fra deformazione trasversale e deformazione longitudinale. Il segno è negativo perché, per sforzi normali di trazione, il campione si allunga e si ha un restringimento della sezione trasversale
dissesti	depressioni plastiche dello strato di usura che causano la rottura del piano viabile, con separazione degli aggregati ed affioramento degli inerti
fatica	perdita delle caratteristiche di resistenza e di integrità per effetto di ripetute sollecitazioni, anche di modesta entità
fessurazioni	lesioni che si sviluppano a causa degli sforzi di trazione indotti negli strati legati a bitume dal carico veicolare, dalle variazioni di temperatura e dalle tecniche costruttive
frequenza	numero di oscillazioni nell'unità di tempo. Si misura in Hertz (Hz).
modulo elastico	rapporto tra tensione e deformazione in condizioni di comportamento elastico del materiale

ondulazioni	cedimenti generalizzati del piano viabile con profilo tipo onda
ormaiamento	formazione di depressioni longitudinali in corrispondenza della zona di passaggio delle ruote: è dovuto ad un accumulo di deformazioni permanenti
risonanza	fenomeno di accrescimento dell'ampiezza delle onde dovuto alla coincidenza fra le frequenze sollecitanti e le frequenze proprie dell'edificio. L'ampiezza dell'oscillazione cresce con tendenza all'infinito e la struttura viene assoggettata a deformazioni sempre maggiori che tendono a provocare il collasso

RINGRAZIAMENTI

Come disse un insolito filantropo che ho avuto la fortuna di incontrare il primo giorno di università:

«il grande sbaglio lo abbiamo già fatto, ed è stato iscriversi ad ingegneria. Tutte le altre sono solo inarrestabili conseguenze».

La mia laurea non è stata certo la conseguenza più inarrestabile, ma di sicuro è stata fortemente attesa.

Ringrazio innanzitutto l'Ing. Valeria Vignali per la dedizione con cui mi ha seguita durante la preparazione della tesi: i suoi consigli sono stati precisi, utili e puntuali ed il suo aiuto è stato preziosissimo. E' stato veramente un piacere poter lavorare insieme a lei.

Ringrazio, inoltre, il Prof. Ing. Giulio Dondi, il Prof. Ing. Andrea Simone e il Prof. Ing. Claudio Galli per l'interesse che hanno dimostrato nei confronti del mio progetto di tesi.

Un ringraziamento particolare va a Pierangelo per il suo aiuto e per il suo entusiasmo, all'Ing. Nabil El Ahmadiè per la sua grande disponibilità e gentilezza, al Geom. Roberto Lugli e al Geom. Veronesi per le preziose informazioni che mi hanno fornito: con il loro aiuto sono riuscita a raccogliere tutto il materiale di cui avevo bisogno e ho avuto l'occasione di frequentare il cantiere in Piazza Roma, partecipando in prima persona ad uno dei progetti più importanti degli ultimi anni per la mia città.

Grazie di cuore

a mio papà perché non potrei immaginarne uno migliore;

a mia mamma, perché mi ha supportata e sopportata in ogni momento, mi ha incoraggiata a tenere duro ad ogni esame, mi ha assordata con la sua gioia quando ho passato Tecnica delle Costruzioni;

alla nonna Rosa perché è di poche parole, ma sono quelle giuste: mi fanno capire che mi vuole bene, che è fiera di me e che potrò sempre andare da lei ogni volta che avrò bisogno di fare cabò;

ai nonni Ada, Dino ed Egidio perché sono sicura che, se potessero essere qui, sarebbero orgogliosi di me;

ai miei fratelli, Giulio e Andrea, perché li stimo profondamente per la cura e la passione che mettono in tutto quello che fanno;

ai miei zii, alle mie cugine, alla mia famiglia perché sono felici di ogni mio successo;

a Marco, per tutto quello che ha sempre fatto per me, perché mi ha dato davvero tutto se stesso e mi dispiace di non essere più riuscita a fare altrettanto. Mi ha insegnato tantissime cose, mi è stato accanto e ha creduto nelle mie capacità più di quanto ci credessi io. Sarà per sempre una delle persone più importanti della mia vita e spero che col tempo possa tornare ad avere fiducia in me;

ad Andrea, Roberta e Wainer perché mi hanno sempre trattata come una sorella e come una figlia;

a Elisa, Ludovica, Arianna, Claudia, Marcello, Gabriele, Stefano, Daniele, Luca e Alberto perché sono amici speciali, di quelli difficili da trovare e di cui non potrei assolutamente fare a meno: mi fanno stare bene quando sono giù di morale e mi fanno stare male (dalle risate) nei momenti sereni;

a Colo, con cui condivido una considerevole predisposizione all'avvilimento, perché ha tantissimo cuore; a Greta perché se non ci fosse dovrebbero inventarla, come la Nutella: non molla mai, nemmeno quando vuole convincermi a non mollare mai; a Scienza delle Costruzioni perché ci ha fatti conoscere: senza di loro non sarebbe stato lo stesso;

a Fanto perché non è mai stitico di preziosissimi insegnamenti di vita; a Serena perché entrambe possiamo contare reciprocamente sull'aiuto dell'altra, anche se non siamo mai d'accordo; a Maria Silvia perché è un'amica sincera a cui manca solo un po' più di sicurezza in se stessa; a Gimmi perché le sue «piccole modifiche»

sono indispensabili; a Fonta perché con lui ho scoperto che oltre l'orizzonte degli eventi di un buco nero ci sono le librerie del Dapt; ai miei compagni di corso con cui ho passato questi anni ad affrontare gli errori irreversibili di Autocad, le interminabili liste per le revisioni e l'attesa della laurea;

ad Andrea perché l'ho assunto come mio supereroe e perché mi ha fatto conoscere persone veramente speciali, in primis lui stesso; ad Alecs, Cerf, Barbara, Marco e all'equipe medica dell'XRum perché mi fanno ridere di gusto, visto che sono «dei gran col1»; ad Albertz e al suo miele perché mi hanno addolcito questi mesi di stesura matta e disperatissima della tesi;

a Marianna, Francesco e Tommaso perché, quando l'amicizia è vera, non importa quanti giorni all'anno si passano insieme;

a Daniele, perché sono felice.

Bibliografia

1. Malnati L., "Origini e affermazione di una strada," in *Mutina oltre le mura. Recenti scoperte archeologiche sulla via Emilia*. Modena: RFM Edizioni, 2004, pp. 25–31.
2. Pellegrini S., "La via Emilia a Mutina dall'età imperiale al tardoantico." in *Mutina oltre le mura. Recenti scoperte archeologiche sulla via Emilia*. Modena: RFM Edizioni, 2004, pp. 32–41.
3. Comune di Modena, *Piano di Riqualificazione del Centro Storico. Mappa 2. Canali e percorsi processionali*. Relazione tecnica a cura dell'Arch. Palmieri I., ottobre 2012.
4. Damieri D., Lodovisi A., Longagnani L., *Modena città sulle acque*. Modena: Provincia di Modena, 2006.
5. Comune di Modena. (2011, novembre) Servizio cartografico, topografico e toponomastica [online]. [Online]. Available: cartografia.comune.modena.it
6. Baracchi O., Manicardi A., *Modena: quando c'erano i canali*. Modena: Artioli Edizioni, 1985.
7. Panini G., *Palazzo Ducale e dintorni*. Modena: Fotocronache modenese, 1997.
8. Borghi P., "Studio sul perimetro della Modena romana e sull'antico percorso della via Emilia tra il Secchia e il Panaro." in *Studi e Documenti della Deputazione di Storia Patria per l'Emilia e la Romagna*, Modena, 1940, vol. IV, pp. 94–103.
9. Guidoni E., "Modena e le città europee: originalità, modelli, derivazioni. la carta di modena medievale." in *L'urbanistica di Modena medievale X-XV secolo: confronti, interrelazioni, approfondimenti*. Roma: Kappa, 1999, pp. 81–93, a cura di Mazzeri C., Guidoni E.
10. Borghi P., "Studio sul perimetro di Modena leodoiniana. Secolo IX." in *Studi e Documenti della Deputazione di Storia Patria per l'Emilia e la Romagna*, Modena, 1943, vol. II, pp. 78–89.
11. Guidoni E., Zolla A., "Trasformazioni storiche del paesaggio urbano dal Medioevo alla fine del Settecento." in *Per un atlante storico ambientale urbano*. Carpi: APM Edizioni, 2004, pp. 81–96, a cura di Boraldi V., Cattani M., Mazzeri C.

12. Labate D., "Le fortificazioni di Modena alla luce dei recenti rinvenimenti archeologici." in *Atti e Memorie della Deputazione di storia patria per le provincie modenesi*, ser. XI. Modena: Aedes Muratoriana, 2011, vol. XXXIII.
13. Costa A., "Modena dopo il modello razionalista. Continuità, discontinuità, crisi dell'azione urbanistica comunale." in *La città razionalista. Modelli e frammenti*. Modena: RFM Edizioni, 2004, pp. 281–291, a cura di Montedoro L., Costa A.
14. Pulini I., "Ottocento anni di archeologia sulla via Emilia." in *Mutina oltre le mura. Recenti scoperte archeologiche sulla via Emilia*. Modena: RFM Edizioni, 2004, pp. 16–24.
15. Arch. Palmieri I., *Piano di Riqualificazione del Centro Storico. Relazione di Sintesi*. Relazione tecnica a cura dell'Arch. Palmieri I., ottobre 2012.
16. Comune di Modena, *Protocollo di Intesa per l'attuazione del Piano di Riqualificazione degli spazi pubblici e strade del centro storico*, 2012.
17. Cervellati P., Scannavini R., De Angelis C., *La nuova cultura delle città: la salvaguardia dei centri storici, la riappropriazione sociale degli organismi urbani e l'analisi dello sviluppo territoriale nell'esperienza di Bologna*. Edizioni scientifiche e tecniche Mondadori, 1977.
18. Servizio di Pianificazione Urbanistica. (2014, agosto) 16 tesi per il P.R.G. di Modena - 1987. Comune di Modena. [Online]. Available: <http://urbanistica.comune.modena.it/prgstorico/16Tesi/Tesi12.htm#Figura26>
19. Arch. Palmieri I., *Piano di Riqualificazione del Centro Storico. Relazione 6. Fisionomia della città: spazi ordinario, spazi quotidiano. Progetto Cervellati - anno 1987- recepito nella Variante al Piano Regolatore per il Centro Storico del 1989*. Relazione tecnica a cura dell'Arch. Palmieri I., ottobre 2012.
20. Comune di Modena, *Rapporto 2011 sul Centro Storico*, 2011.
21. Ufficio Ricerche del Comune di Modena, *Piano Strutturale Comunale: le opinioni dei cittadini modenesi sul futuro della città*, 2013.
22. Arch. Palmieri I., *Piano di Riqualificazione del Centro Storico. Relazione 2. Qualità ambientale e unicità: studio della morfologia urbana e dell'uso dei materiali nella tradizione edile dall'epoca medievale ad oggi*. Relazione tecnica a cura dell'Arch. Palmieri I., ottobre 2012.
23. Comune di Modena, *Un tesoro di marciapiedi: il recupero delle pavimentazioni del centro storico*, 1999.
24. Archivio Luce. (2014, Agosto) Pomonte. costruzione di una massicciata stradale. Fondo Arsial. [Online]. Available: <http://www.archivioluce.com/arsial-luce/scheda/foto/IT-IL-FT00003-00003710/15/Pomonte-Operai-al-lavoro-per-la-costruzione-di-una-massicciata-stradale.html>

25. Ing. Sterpi E., *Le pavimentazioni stradali ad elementi (lezione 10)*. Genova: Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica (DISEG).
26. Biondi G., "Prima del palazzo: la memoria dei castelli," in *Il Palazzo Ducale di Modena: sette secoli di uno spazio cittadino*. Modena: Edizioni Panini, 1987, pp. 149–170, a cura di Biondi A.
27. Vicini E. P., "Notizie sul primo castello degli Estensi in Modena," *Studi e Documenti della Deputazione di Storia Patria per l'Emilia e la Romagna*, vol. II, no. serie I, pp. 71–84, 1937.
28. Silingardi G., Barbieri A., *Enciclopedia modenese*. Verona: Il segno, 2002, vol. 17.
29. Corradini E., Garzillo E., Polidori G., *Il Palazzo Ducale di Modena. Regia mole maior animus*. Fondazione Cassa di Risparmio, 1999.
30. Bertocchi G., Ieranò M., *Le piazze di Modena: passato, presente, futuro*. Il Fiorino, 2013.
31. Bertuzzi G., *Il rinnovamento edilizio a Modena nella prima metà dell'Ottocento*. Modena: Aedes Muratoriana, 1987.
32. Moschi G., *Modena com'era: quattro secoli di immagini*. Modena: Guiglia Edizioni, 1993.
33. Barbolini F., *L'Accademia militare 1943-1992*. Modena: Fotolitografia dell'Accademia, 1993.
34. Russo P., *L'abbassamento del suolo nella zona di Modena (1950-1982)*. Modena: Tecnica Sanitaria, 1985, vol. XXIII.
35. Croci G., "Gli interventi nel Palazzo Ducale di Modena interessato da fenomeni di subsidenza," in *Atti del XIV Convegno Nazionale di Geotecnica*, 28-31 ottobre 1980, pp. 125–134.
36. Labate D., Pellegrini S., "Le mura della città. Lo scavo in Piazza Roma." in *Mutina oltre le mura. Recenti scoperte archeologiche sulla via Emilia*. Modena: RFM Edizioni, 2004, pp. 55–57.
37. Lynn K. Z., *Breve storia dei teatri*. Gremese Editore, 2001.
38. Miserendino D., "Piazza roma, la soprintendenza boccia i giardini pensili," *Il Resto del Carlino*, 6 febbraio 2013.
39. Arch. Cerfogli G., *Riqualificazione architettonica di Piazza Roma. Relazione tecnico-illustrativa*. Relazione tecnica a cura dell'Arch. Cerfogli G., 2013.
40. Comune di Modena, *Recupero e riqualificazione di Piazza Roma. Progetto esecutivo: 1° stralcio. Relazione generale*. Relazione tecnica a cura del Settore Manutenzione, Traffico e Logistica del Comune di Modena, 2013.

41. Boschi N., *Vibrazioni da traffico: analisi numeriche e tecniche di mitigazione*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento e del Territorio (DISTART), 2005, relatore Prof. Ing. Dondi G.
42. Dondi G., Bonini A., "Propagazione delle vibrazioni da traffico: tecniche di mitigazione," in *Convegno Nazionale Traffico e Ambiente*, Trento, 21-25 febbraio 2000.
43. Bucchi A., Dondi G., Bonini A., "Generazione e propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico in aree urbane."
44. Watts G. R., "Traffic-induced ground-borne vibrations in dwellings," 1987, transport and Road Research Laboratory, RR102.
45. Hunaidi O., Tremblay M., "Traffic-induced building vibrations in montréal," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1997.
46. Grandi F., *La progettazione di pavimentazioni antivibranti*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento e del Territorio (DISTART), 2008, relatore Prof. Ing. Bucchi A.
47. Page J., "Dynamic behaviour of a single axle vehicle suspension system: a theoretical study," *Rep. LR 581*, 1973, transport and Road Res. Labs, U.K.
48. —, "Dynamic behaviour of a two axle vehicle suspension system: a theoretical and experimental study," *Supplementary Rep. 119UC*, 1974, transport and Road Res. Labs., U.K.
49. Hunt H. E. M., *Measurement and modeling of traffic-induced ground vibration*. PhD thesis, University of Cambridge, 1988.
50. Hao H., "Analytical modeling of traffic induced ground vibrations," *Journal of Engineering Mechanics*, August 1998.
51. Folchi R., Ferraglio L., "La misura delle vibrazioni indotte dal traffico."
52. Casamenti F., *Pavimentazione stradale: studio della regolarità*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento e del Territorio (DISTART), 2008, relatore Prof. Ing. Dondi G.
53. Boniotto E., *Emissioni di rumore e vibrazioni ambientali prodotte da infrastrutture viarie: analisi sperimentale e modelli previsionali*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Fisica Tecnica, relatore Prof. Zecchin R.
54. Autori vari, Progetto di Ricerca IASPIS, *Interazione Ambiente Sicurezza nel progetto delle infrastrutture stradali. Rapporto conclusivo. Capitolo 3: Vibrazioni*, 1988.

55. Simone A., Lantieri C., Vignali V., "Vibrazioni da traffico in aree urbane: effetti sugli edifici e tecniche di attenuazione."
56. Grandi F., "Vibrazioni da traffico: problematiche e interventi," in *Strade & Autostrade* 3, 2006.
57. Al-Hussaini T. M., Ahmad S., "Design of wave barriers for reduction of horizontal ground vibration," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 1, Gennaio 1991.
58. Massarsch K. R., "Vibration isolation using gas-filled cushions," in *Geofronties 2005 - International Conference*. Austin, Texas: American Society of Civil Engineers, 24-26 Gennaio 2005.
59. Watts G. R., "The generation and propagation of vibration in various soils produced by the dynamic loading of road pavements," *Journal of Sound and Vibrations*, 1992.
60. Dondi G., Simone A., "Soluzioni tecniche innovative per la mitigazione del rumore e delle vibrazioni da traffico stradale," in *Atti della Conferenza Nazionale sulla Politica Energetica in Italia*, Bologna, 2005.
61. Tataranni P., Pettinari M., Sangiorgi C., Simone A., Fornai D., "Applicazione del polverino di gomma da pfu nella tecnica di riciclaggio a freddo."
62. Simone A., "Utilizzo dei granulati di gomma in alcune applicazioni stradali italiane."
63. —, *Relazione Generale sui lavori di rifacimento della sovrastruttura stradale nel centro storico di Demonte per la mitigazione delle vibrazioni da traffico*. ANAS S.p.A. - Compartimento della viabilità per il Piemonte, 2004.
64. Trenti A., *Rilevamento di persone in riprese aeree attraverso l'utilizzo di termocamere ad infrarossi*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Informatica, 2013, relatore Prof. Calderara S.
65. Giancarlo Maselli S.r.l. Diagnostica & Engineering, *Relazione Tecnica EDI 160/10. Accademia Militare di Modena: analisi termografica all'infrarosso sulle volte del salone d'onore e analisi dinamica sulle strutture murarie e sulla volta affrescata*, 2011.
66. Giacobazzi G. (2013, giugno) Risposta all'interrogazione 65579/2013 presentata il 27/05/2013 dal consigliere santoro I. Seduta del 24 giugno 2013 del Consiglio Comunale di Modena. [Online]. Available: <http://www.comune.modena.it/audioconsigliocomunale/archivio/consigliatura-2009-14/archivio-2013/giugno/seduta-del-24-giugno-2013/20130624153726%20GIACOBAZZI%20GABRIE.mp3/view>
67. Pizzoli M., *Aspetti progettuali e ambientali delle pavimentazioni ad elementi*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Diparti-

- mento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento e del Territorio (DISTART), 2011, relatore Dott. Ing. Sangiorgi C.
68. FIP Industriale, *Programma di sperimentazione sul materassino FIP MAT SC 180*, 2005.
69. IN.TECH. S.r.l., *Raccordo autostradale tra l'autostrada A4 e la Valtrompia: i dispositivi di ritenuta*.
70. Simone A., Perra V., Grandi F., "Il problema delle vibrazioni da traffico: il caso della ss 21 nel centro storico di demonte," 2006.